

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Uplatnění DLP / SLA / SLS aditivní technologie ve
vývoji automobilu**

Application of DLP / SLA / SLS additive technology
in car development

Autor práce:

Tomáš Hrbáček

Vedoucí práce:

Ing. Michal Buráň

Rok odevzdání:

2021

Zadání bakalářské práce

Student:

Tomáš Hrbáček

Studijní program:

B3923 Materiálové inženýrství

Studijní obor:

3911R034 Materiály a technologie pro automobilový průmysl

Téma:

Uplatnění DLP / SLA / SLS aditivní technologie ve vývoji automobilu
Application of DLP / SLA / SLS additive technology in car development

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Shrnutí současného stavu využití 3D tisku v průmyslu.
2. Popis technologií DLP, SLA, SLS.
3. Návrh dílu pro využití DLP technologie.
4. Realizace návrhu a zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. Začínáme s 3D tiskem. Přeložil Jakub GONER. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 978-80-251-4876-1.
[2] FILIPI, Bohdan. Plasty. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2003. ISBN 80-86634-13-2.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Buráň**

Datum zadání: 30.11.2020

Datum odevzdání: 30.04.2021

doc. Ing. Petr Tomčík, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Michalu Buráňovi za věcné rady, poznatky a ochotu při působení jako vedoucí této práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přítelkyni za podporu při studiu.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá aplikací aditivních technologií (3D tisku) v oblasti automobilového průmyslu. Konkrétně se v této práci jedná o metody SLA, SLS a DLP, přičemž v teoretické části jsou shrnuty principy, na kterých metody pracují, používané materiály a současný stav používání těchto technologií v automotive. Praktická část práce pojednává o použití DLP tisku v automobilovém průmyslu. Jejím obsahem je návrh několika součástí, které by byly vhodné pro tisk touto metodou a následné odlití jedné z nich k porovnání technologií. Je zde podrobně popsán postup navrhování, úpravy před tiskem a samotný tisk. Obdobně jsou tyto postupy popsány pro odlévání. Na závěr jsou shrnuty poznatky získané z rešeršní a praktické části.

Klíčová slova

3D tisk, AM (Additive manufacturing), SLA (Stereolitografie), SLS (Selektivní laserové slinování), DLP (Digital light processing)

Abstract

This thesis is focused on application of additive manufacturing technologies (3D printing) in the automotive industry. The paper deals specifically with SLA, SLS and DLP methods. While the theoretical part summarizes the principles on which the methods work, the materials used and the current state of use of these technologies in the automotive industry, the practical part of the paper deals with the use of DLP printing in the automotive industry. Its content is the design of several parts that would be suitable for printing by this method and the subsequent resin castings. It describes in detail the process of design and modification before printing, the printing itself, as well as the preparation and casting of the selected part. At the end the findings obtained from the research and practical part are summarized.

Key words

3D printing, AM (Additive manufacturing), SLA (Stereolithography), SLS (Selective laser sintering), DLP (Digital light processing)

Seznam zkratek

2D	dvoudimenzionální	[-]
3D	Trojdimenzionální	[-]
A	Prodloužení při přetržení	[%]
AM	Přírůstková výrobní technologie (<i>Additive manufacturing</i>)	[-]
An	Rázová houževnatost	[kJ/m ²]
CAD	Počítačem podporované projektování (<i>Computer-aided drafting</i>)	[-]
CNC	Číslicové řízení (<i>Computer Numerical Control</i>)	[-]
DLP	Digital light processing	[-]
DMD	Digital micromirror device	[-]
E	Youngův modul, modul pružnosti v tahu	[GPa]
Eo	Modul pružnosti v ohybu	[GPa]
FDM	Fused Deposition Modeling	[-]
PA	Polyamid	[-]
SLA	Stereolitography	[-]
SLS	Selective laser sintering	[-]
UTS (Rm)	Mez pevnosti v tahu (<i>Ultimate tensile strength</i>)	[MPa]
UV	Ultrafialové (<i>Ultraviolet</i>)	[-]
σ	Napětí	[MPa]

Obsah

ÚVOD	1
2 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE	2
2.1 SLA (STEREOLITHOGRAPHY).....	2
2.2 SLS (SELECTIVE LASER SINTERING).....	3
2.3 DLP (DIGITAL LIGHT PROCESSING)	5
3 MATERIÁLY	8
3.1 POLYMERY PRO METODY SLA A DLP	8
3.2 PRÁŠKOVÉ MATERIÁLY PRO METODU SLS	15
4 NAVRHOVÁNÍ A TISK PRO ADITIVNÍ TECHNOLOGIE	19
4.1 ORIENTACE	19
4.2 IZOTROPIE	20
4.3 DOPORUČENÍ PRO TISK	21
5 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE V AUTOMOTIVE	26
6 APLIKACE DLP TISKU V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU	33
6.1 KONSTRUKČNÍ ČÁST.....	34
6.2 PŘÍPRAVA MODELŮ PRO TISK.....	35
6.3 PRŮBĚH TISKU	36
7 ODLÉVÁNÍ SOUČÁSTI	43
7.1 MŘÍŽKA VENTILACE	43
7.2 SKLÍČKO SVĚTLOMETŮ	46
8 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	48
ZÁVĚR.....	51
ZDROJE.....	56
PŘÍLOHY	64

Úvod

V současnosti 3D tisk zaznamenává obří rozmach do velké části průmyslových odvětví a s tím i spojený *rapid prototyping*. I když stále asi nejrozšířenější a obecně nejznámější je FDM (*Fused Depositon Modeling*) tisk, tak existuje mnoho dalších metod pracujících na odlišných principech, které si v dnešní době vydobývají své místo. Část z nich jsou metody SLA, SLS a DLP. Právě tyto metody nalézají uplatnění v mnoha výrobních odvětvích (zubařství, zdravotnictví, potravinářství,...). Tento trend stejně jako ostatní zažívá i automobilový průmysl. I zde si výrobci začali uvědomovat výhody aditivních metod výroby a kvality tisknutých modelů. Proto v poslední době, čím dál, tím více uplatňují tyto technologie do své výroby. To se týká jak přímo komponentů do automobilů, tzn. výroba různých součástí, tak pomocných výrobků jako přípravky atd.

Bakalářská práce se zabývá aplikací SLA, SLS a DLP technologií v automobilovém průmyslu. Tyto metody jsou díky svým vlastnostem dobrou alternativou výroby komponent, či testovacích prototypů. V tomto případě se jedná o přesnost výroby a minimální tloušťku vrstev (až 0,025 mm), čímž vznikají výrobky s vysokou kvalitou povrchu a různou komplexností. V této práci jsou výše zmíněné technologie podrobně teoreticky rozebrány. Práce uvádí principy, na kterých metody pracují, jejich výhody, nevýhody, aplikace součástí vyrobených těmito technologiemi a používané materiály. Praktická část pojednává o DLP tisku pro vybrané díly automobilového průmyslu a srovnává celý proces s procesem odlévání.

Cílem práce je shrnutí dostupných faktů týkajících se SLA, SLS a DLP metod 3D tisku a jejich aplikace v automotive. Dále navrhnout komponenty pro tisk pomocí DLP tiskárny a srovnání této metody výroby s odléváním pryskyřic do silikonové formy.

2 Aditivní Technologie

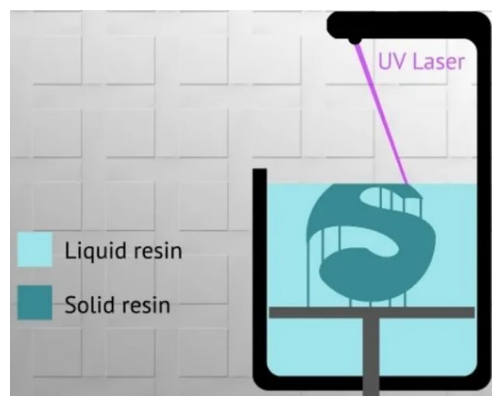
2.1 SLA (*Stereolithography*)

Popis metody

Technologie SLA je označení procesu, při kterém dochází vlivem působení paprsku laseru na fotocitlivou pryskyřici k jejímu vytvrzování. Vytvrzování probíhá po jednotlivých vrstvách, které odpovídají danému 2D průřezu. Pryskyřice je udržována v kádi, která je umístěná na platformě pohybující se ve vertikálním směru. Po vytvrzení jedné vrstvy dojde k posuvu v tomto směru o tloušťku jedné vrstvy (obvykle 0,05 – 0,15 mm). Poté se nanese další vrstva a laser ji opět vytvrdí. Proces se takto opakuje až do úplného zhotovení požadovaného 3D modelu jak je ukázáno na Obr. 1. U tvarově složitějších modelů, obzvláště tam kde se nachází převisy, je nutno zhotovit podpěry, aby nedošlo ke zborcení modelu. Po dokončení se výrobek očistí od přebytečné pryskyřice, a nakonec vloží do dotvrzovací UV stanice (pece), kde dojde k finálnímu vysušení a vytvrzení modelu, případně změně barvy (tzv. *post-processing*). Vlastnosti SLA jsou shrnuty v Tab. 1 [1][2][3][4].

Tab. 1: Vlastnosti SLA tisku [1][2][3][4]

Vlastnosti SLA	
Výhody	Nevýhody
+ Vysoká přesnost (+/- 0,05mm), detaily	– Vyšší pořizovací cena tiskáren
+ Kvalita povrchu	– Vyšší pořizovací cena pryskyřic
+ Možnost dalšího obrábění	– Materiály mohou být nebezpečné
-	– Při špatném nastavení viditelnost krokování vrstev
-	– Součásti jsou obvykle křehké a vlivem UV může docházet k dalšímu křehnutí
-	– Uvnitř dutin zůstává nevytvrzený resin



Obr. 1: Princip metody SLA [2]

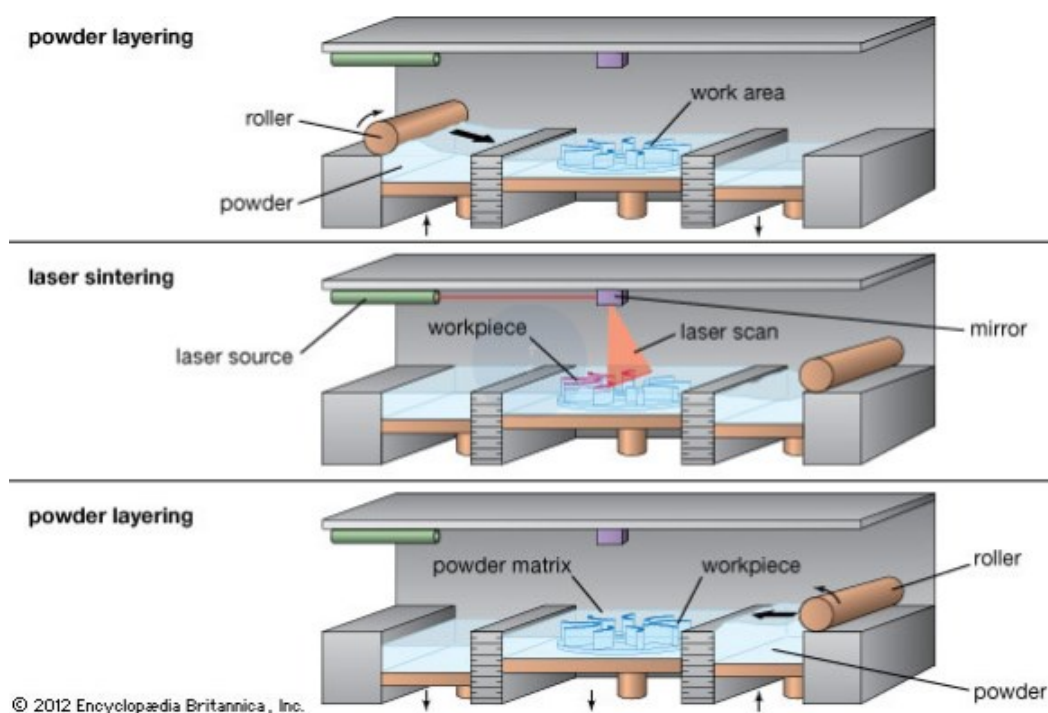
2.2 SLS (*Selective Laser Sintering*)

Popis metody

Jedná se o proces, při kterém dochází k formování, zhutňování a spékání materiálu pomocí laseru (tepla a/nebo tlaku). Na rozdíl od předchozí metody, však nedochází k vytvrzování tekuté pryskyřice, ale ke spékání práškového polymeru. Tento prášek je umístěn v oddělené komoře nebo komorách a na pracovní plochu je dopravován pomocí válečku. Pracovní deska s práškem je umístěna v teplé komoře vyhřáté na teplotu nižší, než je teplota slinování. K tisku součástí dochází nanášením jednotlivých vrstev na pracovní desku, poté je každá vrstva prášku, která odpovídá 2D části výrobku spečena pomocí laseru. Následně se podložka posune v kolmém směru dolů o tloušťku jedné vrstvy tak, jak je znázorněno na Obr. 2. Takto se celý proces opakuje, dokud není dokončena poslední 2D část. Konečný díl je poté zcela zasypán v prášku spékaného materiálu. Tento fakt je výhodný vzhledem k tomu, že součást nemusí být v některých částech podepřena tak jako u SLA. Toho se využívá pro vysoce komplexní díly, příkladem může být sací potrubí. Po dokončení procesu je nutno součást očistit a vytáhnout z přebytečného materiálu, který lze dále s jistými omezeními použít pro zhotovení dalších výrobků [3][5][6][7].

Tab. 2: Vlastnosti SLS tisku [3][5][6][7]

Vlastnosti SLS	
Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> + Nejsou potřeba podpěry + Silné a odolné výtisky (i chemicky) - - - - - - 	<ul style="list-style-type: none"> - Nákladné čištění stroje - Jeden stroj na jeden typ prášku - Póry na vytištěných dílech - Vysoká cena tiskáren - Limitované množství materiálů - Smrštění materiálu - Hořlavost prášků - Velké množství odpadu

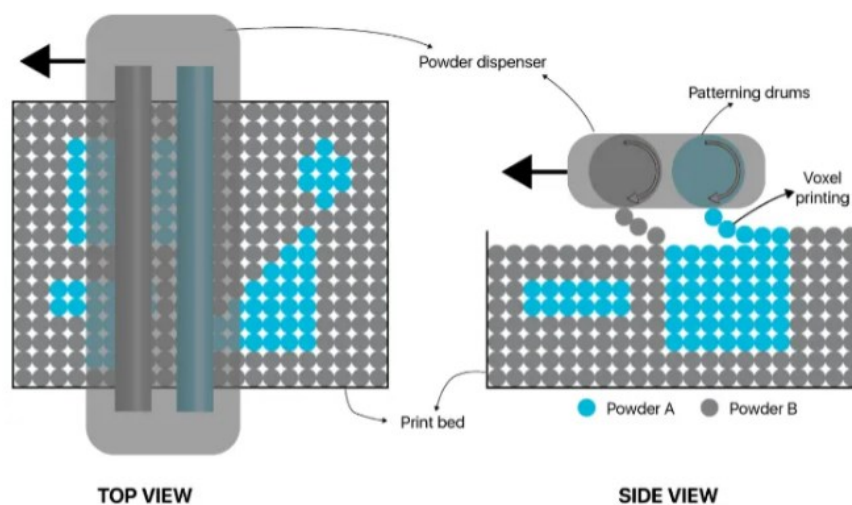


Obr. 2: Princip technologie SLS [4]

SLS 3D tisk se dvěma druhy prášků

Firma Aerosint přišla s návrhem tisku pomocí dvou prášků tzv. multipowder SLS. Na rozdíl od klasického se používá jeden prášek jako podpurný (levnější) a druhý jako konstrukční viz. Obr. 3. Tímto proces zamezí znehodnocení tiskového prášku, který u klasického SLS je vystaven delší dobu zvýšené teplotě a tím dochází

k chemickým změnám. Tím pádem ho nelze stoprocentně znovu použít a je nutné mísení s 50 % neporušeného prášku [9].



Obr. 3: Princip SLS se dvěma prášky [9]



Obr. 4: SLS tiskárna QLS 350 [10]

2.3 DLP (*Digital light processing*)

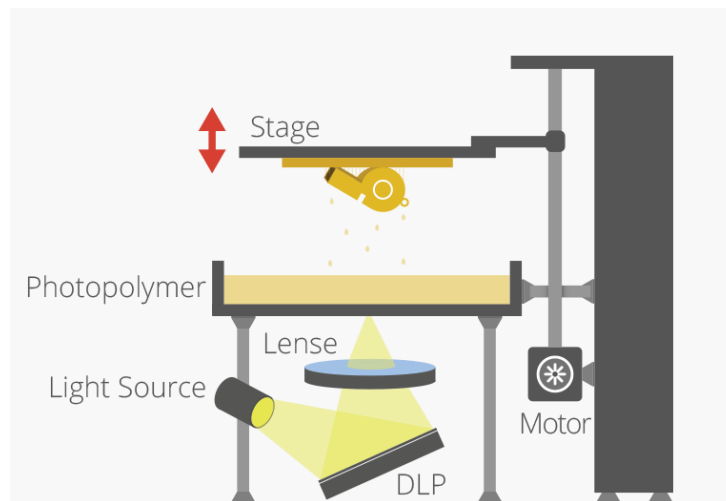
Popis metody

Tato metoda 3D tisku je v principu velmi podobná metodě SLA, jak lze vysledovat z Obr. 5. Pracovním materiálem je také fotopolymer, který je pomocí světla vytvrzován. Na rozdíl od SLA však tato metoda nevyužívá k vytvrzování jako zdroj světla laser, ale speciální projektor využívající panel z tekutých krystalů (LCD) nebo tzv. DMD projektor (*Digital Micromirror Device*). V případě DMD se jedná

o sestavu tisíce mikro zrcátek, která se používají pro usměrnění paprsku promítaného projektorem. Avšak hlavním rozdílem je skutečnost, že projektor ozáří (vytvdí) celou vrstvu najednou, nevytvrzuje bod po bodu jako při předchozí technologii, což proces značně urychluje. Výsledkem DLP jsou velmi detailní výtisky, které se mohou kvalitou měřit i se SLA drahými tiskárnami při menších nákladech. S tímto je spojen hladký povrch s minimem dalších úprav. Kromě kvality detailů je to i vyšší rychlost, způsobena vytvrzováním celé vrstvy najednou. Výhodou je i jednodušší údržba, protože nemusíme udržovat tak velké množství polymeru (používají se mělčí kádě), to usnadňuje i výměnu stávajícího materiálu za jiný. Naopak stejně jako u prvního systému je i zde nutno použít podpěry proti zhroucení modelu [4][11][12][13].

Tab. 3: Vlastnosti DLP tisku [4][11][12][13]

Vlastnosti DLP	
Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> + Vytvrzení celé vrstvy najednou + Rychlejší než SLA + Přesnost + Kvalita povrchu + Levnější než SLA - 	<ul style="list-style-type: none"> – Vyšší pořizovací cena pryskyřic – Materiály mohou být nebezpečné – Při špatném nastavení viditelnost krokování vrstev – Nutnost tvořit podpěry – Uvnitř dutin zůstává nevytvrzený resin – Součásti jsou obvykle křehké a vlivem UV může docházet k dalšímu křehnutí



Obr. 5: Princip metody DLP [4]



Obr. 6: Tiskárna DLP PHOTOCENTRIC LC MAGNA [16]

3 Materiály

Tato kapitola popisuje materiály používané u zadaných technologií 3D tisku. V případě SLA a DLP se jedná o tekuté reaktoplastické pryskyřice. U Metody SLS to jsou pevné práškové materiály. Spolu se základní charakteristikou se kapitola zabývá mechanickými a transparentními vlastnostmi těchto látek. Navíc jsou zde u pryskyřic zmíněny varianty jejich vytvrzování.

3.1 Polymery pro metody SLA a DLP

Fotopolymery

Látky složené ze tří základních prvků, které spolu chemicky reagují za působení vytvrzujícího paprsku. Základními složkami jsou monomery, které tvoří zároveň základ (cca 95%). Dále je to fotoindikátor, který ovlivňuje rychlost vytvrzování, to znamená, že čím větší bude jeho podíl, tím rychleji dojde k vytvrzení. Poslední složkou je blokátor. Ten ovlivňuje hloubku průchodu záření a výslednou tloušťku vrstvy [17].

Fotopolymery lze rozdělit do tří skupin. První skupinou jsou akryláty, které byly vyvinuty koncem 80. let. Jsou tedy nejstarší z dostupných. Jejich hlavními nevýhodami, oproti ostatním, je jednak menší míra vytvrzení a také náchylnost k nepřesnostem vlivem smršťování a kroucení. Lepšími a modernějšími materiály jsou pak epoxidové pryskyřice. S nimi jsme schopni vytvořit přesnější, tvrdší a silnější výrobky než s předchozím materiálem, nicméně se tady objevují jiné problémy. Těmi jsou hlavně křehkost a citlivost vytisknutých součástí na vlhkost. V dnešní době se běžně tyto dva druhy materiálů kombinují a tím jsme schopni získat výhodné vlastnosti obou dvou druhů. Posledním typem jsou plněné pryskyřice. Bývají vyplňovány nejčastěji organickými materiály, kovy nebo keramikou. Jsou vhodné pro aplikace, kde dochází k vyššímu namáhání a pro tvarově složité díly [3].

Mechanické vlastnosti SLA materiálů

Jedním z velice důležitých parametrů určujících materiály pro tisk jsou podobně jako u jiných materiálů (ocel, slitiny kovů,...) mechanické vlastnosti. Tyto vlastnosti jsou ovlivňovány celou řadou činitelů. Obecně to může být typ pryskyřice, protože existuje široká škála druhů pro různé aplikace, kde se mechanické vlastnosti

a chování materiálu při zatížení mohou razantně lišit. Dalším aspektem je typ použité tiskárny. Je zřejmé, že průmyslové tiskárny budou tisknout s jinými parametry než typy, které jsou určeny pro amatérský a hobby tisk. S tiskárnami souvisí i nastavení tisku. Různě nastavené parametry (rychlost tisku, prodleva při vytvrzování laserem, tloušťka vrstvy, propojení vrstev,...) jsou schopny určitým způsobem ovlivnit výsledné mechanické vlastnosti, strukturu a vzhled vytisknuté součásti. Samozřejmě také záleží na správném dodržení zásad pro tisk tak, aby bylo dosaženo požadovaného výsledku. Výzkumy navíc potvrzují, že orientace součásti na pracovní desce tzn. jejich natočení v osách, ale i to zda je součást umístěna na hraně, či na ploše má vliv na konečné vlastnosti. Dle autorů z thajské univerzity, která zkoumala vlivy na mechanické vlastnosti epoxidové pryskyřice Watershed 11122 firmy DSM Somos, jejíž vlastnosti z datasheetu jsou uvedeny na Obr. 7, se umístění zkušebních vzorků projevuje tak, jak je uvedeno na Obr. 8. Rozložení zkušebních vzorků, graf srovnání a šrafování při tisku jsou uvedeny v příloze A [18].

Description	Elastic modulus(MPa)
Tensile strength	47.1–53.6 MPa
Elongation at break	11–20%
Elongation at yield	3.0%
Elastic modulus	2,650–2,880 MPa

Obr. 7: Údaje z datasheetu testované pryskyřice [18]

Build orientation		Elastic modulus (MPa)	UTS (MPa)	Elongation at UTS (%)	Elongation at break (%)
Flat	0 degree	2,038.29±65.35	37.75±1.82	3.45±0.11	11.67±4.97
	45 degrees	2,204.74±3.80	43.25±0.98	3.51±0.03	7.60±3.48
	90 degrees	2,121.16±109.64	38.24±2.22	3.26±0.08	8.53±4.29
Edge	0 degree	2,339.23±20.09	46.07±0.99	3.54±0.07	9.27±1.10
	45 degrees	2,409.02±15.40	47.70±0.52	3.65±0.02	9.00±3.57
	90 degrees	2,337.82±15.09	45.72±0.48	3.50±0.05	6.60±0.30

Obr. 8: Výsledek výzkumu [18]

Z Obr. 8 lze vypožorovat, že u vzorků položených na plocho i na hraně vykazuje nejlepší pevnostní vlastnosti, kromě prodloužení při přetržení, vzorek umístěný 45° od osy X, což způsobil zejména způsob tisku resp. šrafování součásti při tisku.

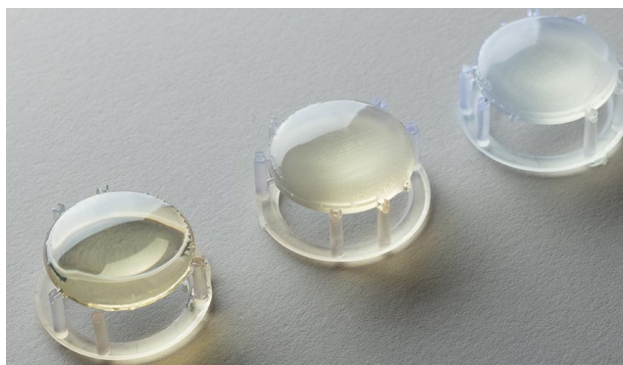
Kromě samotné orientace má na výsledné mechanické vlastnosti také typ a délka dotvrzování součásti. I tento vliv vzali výzkumníci v potaz a nechali na součásti působit UV světlo po různou dobu, přičemž výsledné hodnoty jsou uvedeny na Obr. 9. Závěrem bylo, že s delším působením UV světla se postupně začínají zvyšovat i vlastnosti, především mez pevnost v tahu a modul pružnosti v tahu.

Post-curing period	Elastic modulus (MPa)	UTS (MPa)	Elongation at UTS (%)	Elongation at break (%)
0 hours	1,932.12±91.98	33.61±1.53	3.34±0.14	8.39±2.37
2 hours	2,093.37±28.71	38.13±0.28	3.54±0.02	9.74±0.86
4 hours	2,228.07±40.16	41.69±0.29	3.67±0.01	8.58±2.53
6 hours	2,234.90±26.17	42.30±0.22	3.63±0.04	7.96±4.86
8 hours	2,263.12±42.90	42.90±0.42	3.62±0.02	8.26±1.91

Obr. 9: Změna vlastností vlivem různých dotvrzovacích časů [18]

Optické vlastnosti materiálů a tisk transparentních součástí

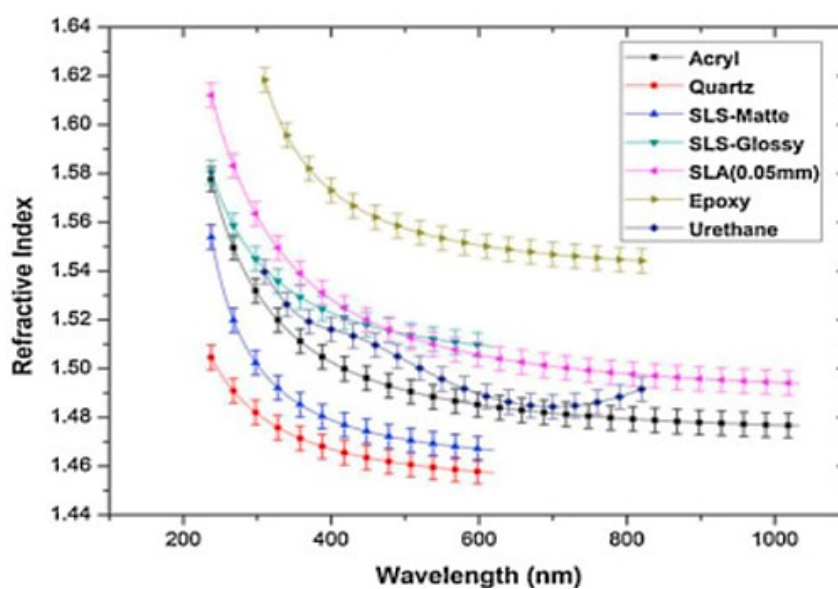
Použitím vhodných pryskyřic lze metodou SLA (DLP) tisknout i transparentní díly. Z dostupných metod 3D tisku se dokonce jedná o jednu z nejlepších možností pro tento typ výtisků. Nevýhodou tohoto procesu je, že tisknutím pomocí SLA (DLP) nejsme schopni vytisknout plně průhledný materiál (dosahujeme jen určitého stupně průsvitnosti) a proto je nutné po tisku upravit povrch daného výrobku. K dosažení úplné průhlednosti lze použít metody ručního broušení a leštění, nástřik povrchu čirým lakem nebo nanesení povrchového povlaku pryskyřice viz. Obr. 10. Ve srovnání s ostatními materiály a technologiemi výroby SLA vykazuje vysokou průhlednost a výhodný index lomu světla. Index lomu popisuje šíření světla (rychlost) a elektromagnetického záření v látkách. Úzce souvisí s lomem světla a rozkladem světla na rozhraní látek. Je dán Snellovým zákonem, pomocí kterého lze vypočítat index lomu světla jako poměr rychlosti prvního a druhého prostředí nebo jako poměr úhlu dopadu a úhlu odrazu. Porovnání této veličiny pro různé materiály nalezneme na Obr. 11 a v Tab. 4 [19][20][21][22].



Obr. 10: Úprava povrchu pomocí nanesení povlaku z pryskyřice s finální fází úplně vlevo [20]

Tab. 4: Porovnání vlastností transparentních materiálů [20]

Materiál	Index lomu světla (532 nm)	Průhlednost
Akryl	1,4888	+++
Křišťál	1,4597	+++
SLS (matné)	1,4695	+
SLS (lesklé)	1,5124	+
SLA	1,5105	+++
Epoxid	1,5547	+++
Uretan	1,4984	+++



Obr. 11: Porovnání materiálů vyrobených různou technologií (SLA, SLS a vakuové lití) [20]

Příklady pryskyřic

V dnešní době je několik typů pryskyřic, které jsou vhodné pro požadované využití s rozmanitými vlastnostmi. Obecně je lze rozdělit do několika základních skupin: Standartní; Pro strojní součásti, do této skupiny lze zahrnout flexibilní, elastické, průsvitné či transparentní, odolávající vyšším teplotám (238°C), tvrdé a odolné, dále pak skupiny materiálů pro specifické obory jako jsou lékařské pryskyřice; pryskyřice pro šperkařství; zubní lékařství a pro speciální použití (např. plněné keramikou a s vyššími tlumícími vlastnostmi). Výhodou také je, že většinu z výše zmíněných je možno sehnat ve více barevných provedeních nebo pro zabarvení použít pigmentové sady [23].

Níže uvedené příklady pryskyřic jsou převzaty z datasheetu firmy Formlabs pro srovnání a ukázkou jaké materiály je dnes možné používat. Informace o dalších materiálech obsahují přílohy B, C a D.

Univerzální

Materiál vhodný pro výrobu a testování forem pro vstřikování, přípravky, výrobu silikonů a plastů [23].

Tab. 5: Mechanické vlastnosti univerzální pryskyřice Formlabs [23]

Mechanické vlastnosti	Pouze vytisknuté	Po vytvrzení
Rm [MPa]	35	61
E [GPa]	1,4	2,6
A [%]	32,5	13
Eo[GPa]	0,94	2,2

Elastic 50A

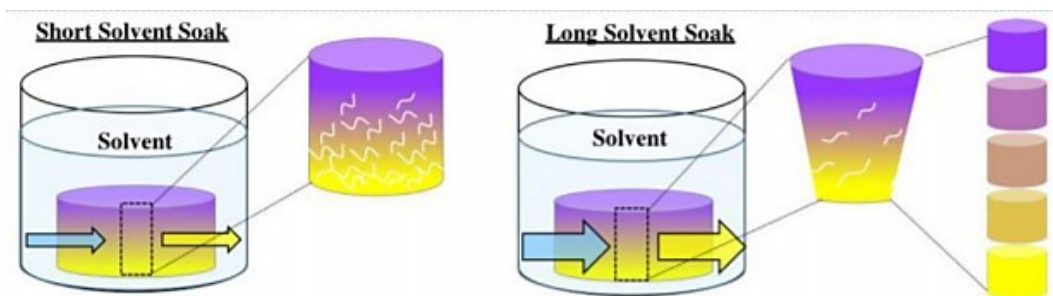
Tento typ je vhodný pro výrobu součástí, které jsou obvykle vyrobeny ze silikonu. Tyto součásti jsou schopny odolat ohnutí, natahování a stlačení v opakovaných cyklech bez roztržení a rychle se vrací zpět do původního stavu [23].

Tab. 6: Mechanické vlastnosti Elastic 50A [23]

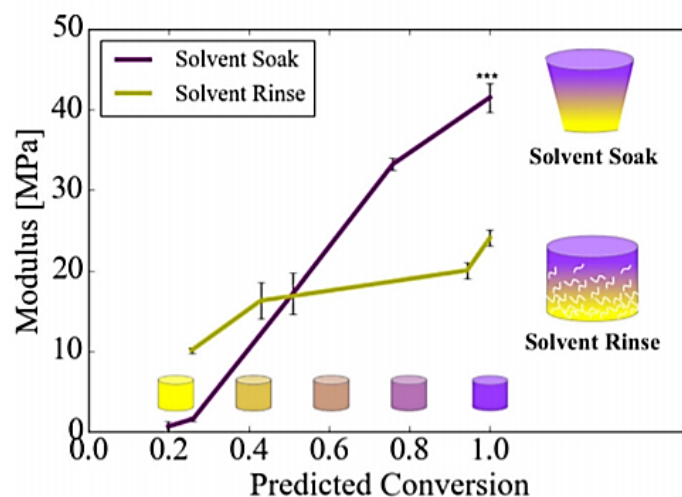
Mechanické vlastnosti	Pouze vytisknuté	Po vytvrzení
R _m [MPa]	1,61	3,23
A při roztrhnutí [%]	100	160
σ při 50% prodloužení [MPa]	0,92	0,94
σ při 100% prodloužení [MPa]	1,54	1,59
Tvrдость podle Shoreho [A]	40	50

Metody dotvrzování pryskyřic

Na konečné mechanické vlastnosti kromě použitého materiálu má výrazný podíl také způsob čištění a vytvrzení. Očištění bývá obvykle prováděno buď pomocí rozpouštědla (příkladem může být Ethanol) a dotvrzení obvykle pomocí UV nebo pomocí přidání dodatečného tepelného vytvrzení. Rozpouštědlo lze aplikovat jen jako oplach vytištěného dílu nebo lze použít ponoření dílu v rozpouštědle. Rychlý oplach ušetří čas i náklady, nicméně má za následek pouze očištění povrchového přebytečného resinu. Vlivem tohoto zůstává uvnitř součásti velký objem monomeru, což sice zmenšuje smrštění, ale může způsobit plastifikaci uvnitř dané součásti a tím i snížení pevnostních vlastností. U druhého typu resp. u ponoření součásti do rozpouštědla dochází sice k odstranění přebytečného monomeru zevnitř součásti, ale je nutné počítat se smršťováním při schnutí součásti a možným vznikem vad jako jsou vlny, či případné prasklinky na povrchu, průběh těchto jevů je znázorněn na Obr. 12. Při porovnání obou metod na Obr. 13 lze pozorovat, že při plné přeměně (dotvrzení) ponořením součásti se modul pružnosti v tahu (resp. tlaku) zvýší až na hodnotu cca 42 MPa vlivem odstranění přebytků zevnitř součásti, na rozdíl od rychlého oplachu, kdy se hodnota pohybuje zhruba na 24 MPa [24].

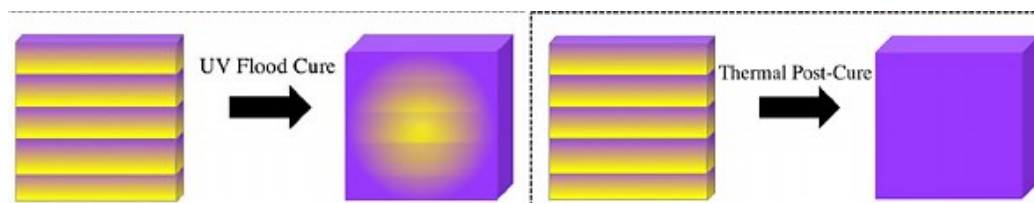


Obr. 12: Průběh přeměny [24]

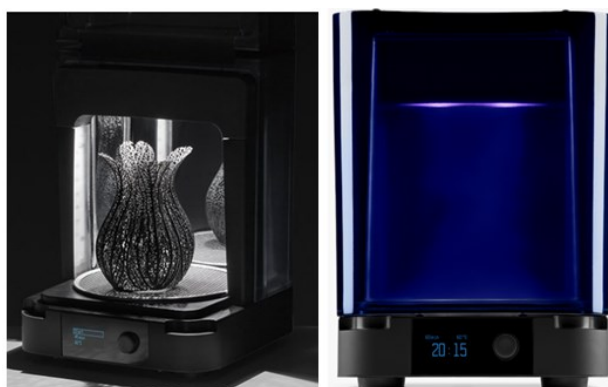


Obr. 13: Porovnání modulů ponořeného a opláchnutého vzorku [24]

Pro dosažení úplné přeměny rovnoměrně v celém objemu dílu je vhodné zařadit proces dvojitého vytvrzení, a to kvůli tomu, že tiskem a následným dotvrzením UV se dosáhne 10 až 60procentního vytvrzení objemu viz. Obr. 14. Při zařazení tepelného způsobu dojde k úplnému vytvrzení součásti. Příklad toho, jak mohou vypadat vytvrzovací zařízení je znázorněno na Obr. 15. [24].



Obr. 14: Porovnání způsobů dotvrzení [24]



Obr. 15: Příklady vytvrzovacích stanic [25]

3.2 Práškové materiály pro metodu SLS

Vlastnosti prášku

Pro kvalitní výsledek *sintrování* je nutno zvolit vhodný druh prášku. Přestože teoreticky by se dal každý prášek spékat, v realitě to tak nefunguje a každý materiál reaguje na vystavení tepla laseru jinak. A to tak, že se mohou rozpínat, ale i na druhou stranu smršťovat, přičemž je nutno tuto vlastnost materiálu brát v úvahu. Pro ideální stav by bylo samozřejmě vhodné, kdyby prášek nevykazoval ani tendenci ke smrštění ani k rozpínání. Dalším prvkem ovlivňujícím proces je zhutnění prášku, které by mělo být co největší možné s hladkou a rovnou plochou, tak aby zajistilo efektivní působení laseru a zároveň, aby prášek působil jako podpora pro převisy a letmé prvky [3].

Nejpoužívanějšími materiály pro technologii SLS jsou nylony, tedy polyamidy. Jejich hlavními výhodami je nízká hmotnost, pevnost a zároveň pružné vlastnosti. Jedná se o termoplast, jehož nejběžnější používané varianty pro *sintrování* jsou polyamidy PA 11 (Nylon 11) a PA 12 (Nylon 12). Vlastnosti těchto materiálů jsou shrnuty v Tab. 7 [26].

Tab. 7: Mechanické vlastnosti sintrovacích prášků [26]

Mechanické vlastnosti	PA 12	PA 11
R _m [Mpa]	50	48
E [Gpa]	1,85	1,56
A [%]	12	35

Výhodou polyamidového prášku je možnost vyplnění různými přísadami. Jedná se například o uhlíková vlákna, skelná vlákna nebo hliník. Toto plnění se provádí pro zlepšení mechanických či tepelných vlastností. Nevýhodou tohoto plnění je skutečnost, že takto vyplněné materiály jsou obvykle křehčí a mají vysoce anizotropní vlastnosti [27].

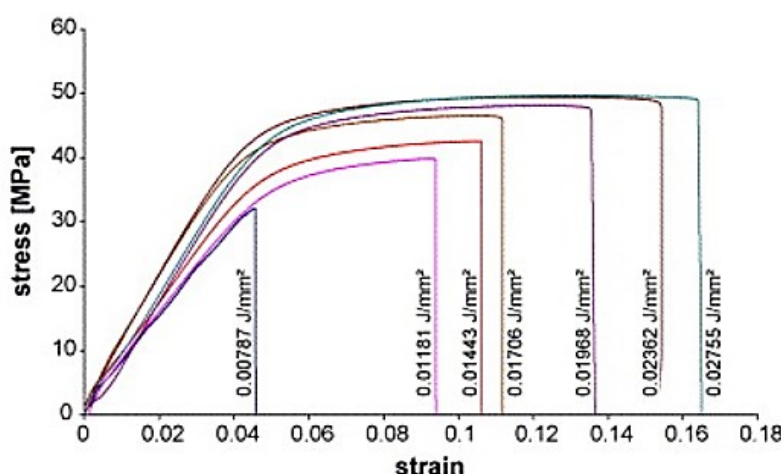
Příkladem plněných materiálů mohou být například Polyamid plněný skleněnými vlákny PA 3200 GF, obsahující 30% skleněných vláken. Dalším příkladem je směs polyamidu s Al částicemi zvaný Alomid. Posledním uvedeným materiálem je polyamid PA 11 s karbonovými vlákny. Porovnání vlastností jednotlivých materiálů je v tabulce níže (Tab. 8) [28][29][30][31][32].

Tab. 8: Porovnání vlastností plněných prášků [28][29][30][31][32]

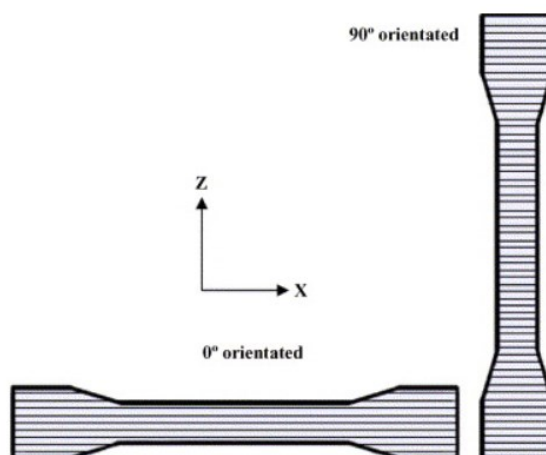
Mechanické vlastnosti	PA 3200GF	Alumid	PA 11 black CF
R _m [Mpa]	51	48	82
E [Mpa]	3200	3800	5900
An (při 23°C) [kJ/m ²]	5,4	4,6	8.7
Tvrdość dle Shoreho [Shore D]	80	76	-
A [%]	9	4	7

Kromě výše zmíněných vlastností a používaných materiálů, je nutno brát v úvahu také faktory nastavení tisku, které ovlivňují výsledné mechanické vlastnosti a kvalitu součástí. Z těchto parametrů jsou nejdůležitější hustota dodané energie laseru, orientace dílu na pracovní ploše, tloušťka vrstvy, konzistence prášku, typ materiálu a pracovní teploty [33].

Na obrázku níže (Obr. 16) lze pozorovat závislosti napětí-deformace na úrovni hustoty energie. U křivek tisku s nízkou hustotou energie bude materiál vykazovat křehké chování, naopak u křivek s vyšší hustotou dodané energie se vazby mezi práškovými částicemi zesilují a materiál je daleko tvárnější. Nutno dodat, že se jedná o zkušební vzorky uložené pod úhlem 0°, tedy „naležato“ viz. Obr. 17 a zkušebním materiálem byl DuraForm™ polyamide (PA). Závislosti dalších veličin na hustotě energie jsou zobrazeny v příloze E.



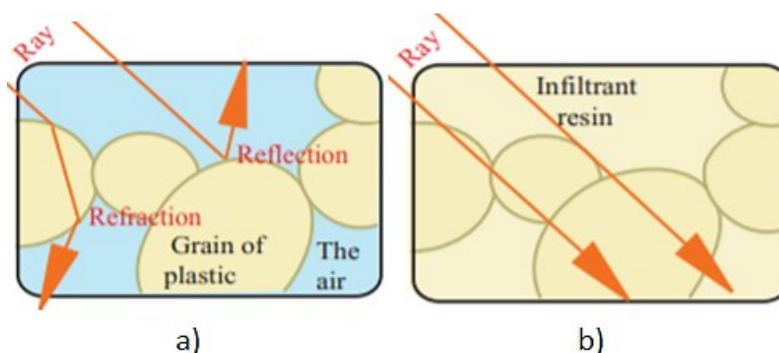
Obr. 16: Závislost napětí a deformace pro křivky s různou hustotou energie [33]



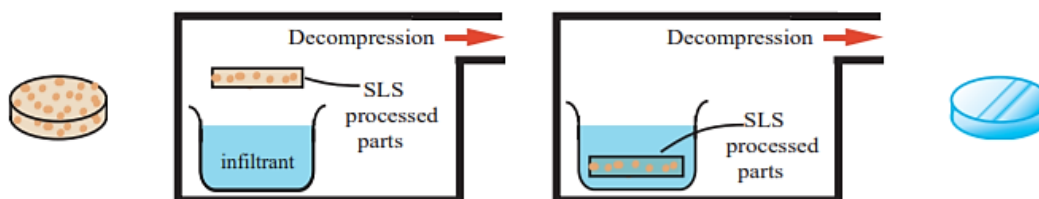
Obr. 17: Orientace zkoušených vzorků [33]

Optické vlastnosti a tisk transparentních součástí pomocí SLS

Pomocí SLS lze taktéž produkovat transparentní díly, jen je zde několik problémů, které výrazně ovlivňují samotný proces. Jedním z hlavních je fakt, že ačkoliv můžeme tisknout transparentní materiály jako polymethylmetakrylát (PMMA), tak dosáhneme pouze neprůhledné struktury. Tento jev je způsoben vysokou pórovitostí materiálu, tak jak zobrazuje Obr. 18. Proto byla vytvořena speciální metoda, jejíž celý průběh je zachycen na Obr. 19, tzv. infiltrace porézního materiálu UV vytvrditelnou pryskyřicí. K infiltraci pryskyřice do prášku se používá vakua, kde dojde k odstranění vzduchu z pórů, poté se součást ponoří do pryskyřice upravující index lomu světla a dochází k vyplnění mezer mezi póry. Nakonec je materiál vyjmut z komory a vytvrzen [34][34].



Obr. 18: Na snímku a) lze pozorovat, jak se odráží světelný paprsek při průchodu porézním materiálem, kde dochází k rozptýlení paprsku vlivem přechodu mezi dvěma prostředími plast/vzduch. Na obrázku b) vidíme sjednocení struktury pomocí pryskyřice, která umožňuje průchod světlu, a tedy i transparentnost [34]



Obr. 19: Průběh procesu úpravy prášku [34]

Pro kvalitní výsledek je nutné, aby použitý práškový materiál a infiltrační pryskyřice měli co nejvíce podobný index lomu světla. Rozdíly mezi těmito veličinami lze v praxi sledovat při oddálení vytisknutých vzorků od pozadí, tak jak je uvedeno na Obr. 20. Kromě těchto parametrů se výrazně na konečném výsledku projevuje i následné vytvrzování pryskyřice, kdy pomalé dlouhotrvající vytvrzování vytvoří kvalitní průhlednost materiálem. Dalším vlivem jsou parametry slinování prášku. V případě této metody se jedná o výkon laseru, kdy větší výkony zvyšují zakalení, naopak nižší výkon snižuje pevnost. Z těchto důvodů je třeba provést kompromis mezi oběma faktory tak, aby výsledný stav měl dostatečnou pevnost a vhodnou průhlednost. Oba činitele jsou zobrazeni na snímcích v příloze F [34].

Index Difference	0.0004	0.0002	0.0000	0.0002	0.0004
Photo					
Haze [%]	50.5	23.6	21.3	33.3	35.0

Obr. 20: Různá čírost a zakalení vzorků s různými rozdíly indexu lomu světla mezi pryskyřicí a práškem [34]

4 Navrhování a tisk pro aditivní technologie

Pravidla následující kapitoly se týkají souhrnně SLA, DLP i SLS tisku s tím, že u SLS jsou tyto zásady vhodné zejména pro polyamidy.

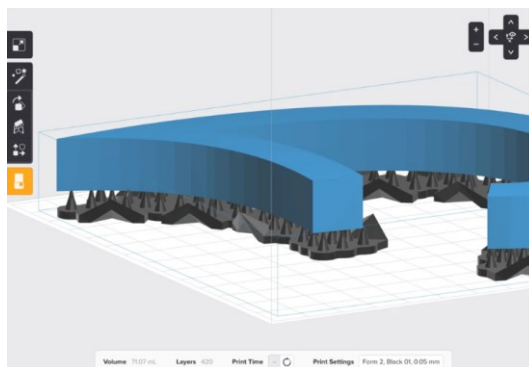
4.1 Orientace

Při tisku pomocí SLA (DLP) je možné umístit tisknutou součást jakkoliv na pracovní plochu. Avšak ne každá pozice nebo natočení je vhodné pro tisk a může způsobit v nejlepším případě vyšší spotřebu materiálu. Ta je způsobena vlivem zbytečně velkého množství nebo nevhodně zvolených podpěr výtisku. Většími problémy může být zbortění při tisku, zhoršená kvalita povrchu, či vady vzniklé v nebo na součásti, tak jak zobrazuje Obr. 21. Pro správnou orientaci součásti je vhodné se řídit několika zásadami.

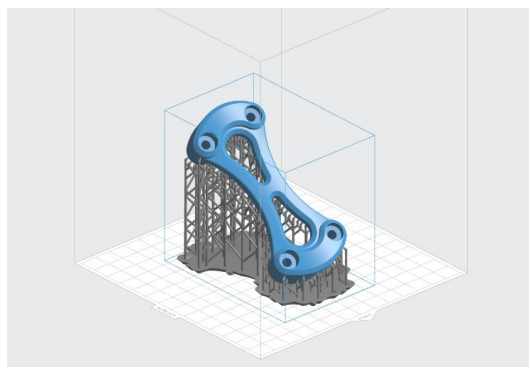


Obr. 21: Vznik možných vad při špatné orientaci [35]

Při orientaci dílu pro SLA je největším problémem průřezová plocha vertikální osy (Z), protože součást má při velké stykové ploše tendenci se lepit na pracovní plochu, což lze vidět na Obr. 22. Tyto síly spojené s lepením tištěné součásti na povrch jsou přímo úměrné ploše 2D průřezu tisku. Z tohoto důvodu je optimální součást tisknout pod určitým úhlem k desce. Toto umístění sice navýší počet podpěr, ale minimalizuje to šanci přilepení součásti a tím i jejího znehodnocení. Příklad takového návrhu můžeme vidět na Obr. 23. *Sintrování* je tímto faktem neovlivněno vzhledem k zasypání součásti práškovým materiálem [35][36][37].



Obr. 22: Přilepení součásti vlivem velkého průřezu v ose z [37]



Obr. 23: Správně naorientovaná součást [37]

Jak již bylo řečeno, je vhodné natočit prvky vzhledem k vertikální ose (Z) tak, aby se snížil průřez v rovině kolmé na tuto osu. Takovéto řešení se ve většině případů projeví navýšením počtu podpěr. V některých případech dojde dokonce k takovému nárůstu, že tisk pomocí SLA (DLP) již není vhodný z hlediska spotřeby materiálu a nákladů. Další možností je, že podpěry zasahují natolik do vzhledu součásti, že konečný výsledek není vizuálně uspokojivý. K zamezení tohoto jevu lze použít několik variant, jako zmenšení počtu horizontálních a převislých prvků, kde je podpěr potřeba, zmenšení průřezové plochy, vytvoření odlehčovacích otvorů, pokud je to možno, či jinak upravit model [36][37].

4.2 Izotropie

Výtisky pomocí metody SLA (DLP) mohou těžit z toho, že jsou izotropní, a tedy že vlastnosti jsou ve všech směrech stejné. Izotropie je způsobena, tím že se jednotlivé vrstvy při vytvrzení chemicky spojí. Tento jev má za následek to, že ve všech směrech, resp. skoro v celé součásti, jsou vlastnosti velmi podobné a tedy je jedno

jestli součást tiskneme kolmo, či rovnoběžně se základní deskou. Tím je umožněna variabilita při výběru orientace součásti na desce [36].

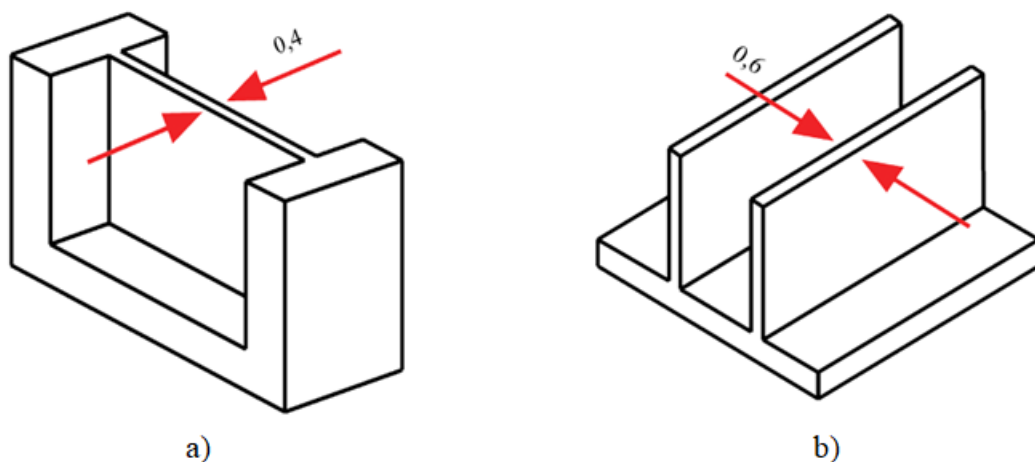
4.3 Doporučení pro tisk

Úroveň detailu, kterou může SLA (DLP) tisk poskytnout, závisí převážně na typu tiskárny (velikosti laserového bodu) a typu pryskyřice (jejich vlastnostech). Nicméně obecně se dá řídit několika pravidly.

Tisk stěn

Existuje několik návodů jak postupovat při návrhu stěn a jejich tloušťky. Podle firmy 3D Hubs lze dělit stěny na ty, které se dotýkají alespoň na dvou stranách výtisku a stěny, které se dotýkají pouze jednou stranou zbývajících částí dílu viz. Obr. 24. U prvního typu je relativně malá šance na deformaci, či zborcení, a doporučená tloušťka těchto stěn by měla být minimálně 0,4 mm. U stěn s jednou stykovou plochou je šance na deformaci daleko větší, a proto se doporučuje minimální tloušťka 0,6 mm a stěny by měly být navrhovány tak, aby došlo ke snížení koncentrace napětí ve spoji [36][37][38].

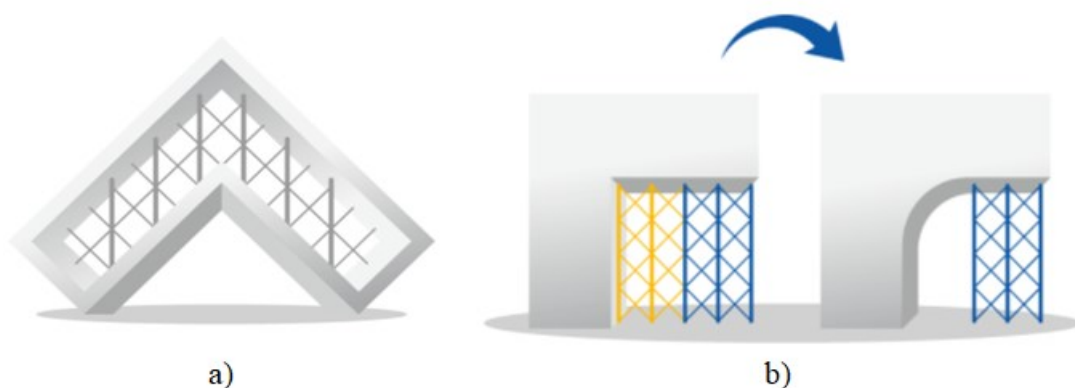
Naopak firma Materialise doporučuje určovat tloušťku stěn podle celkové velikosti modelu. Malé součásti, jejichž součet rozměrů ve všech osách je menší než 200 mm, vyžadují minimální tloušťku stěny 1 mm. U středních součástí se součtem rozměrů mezi 200 a 400 mm se doporučují alespoň 2 mm tloušťky. Pro větší je nutná minimální tloušťka 3 mm [35].



Obr. 24: Příklady napojení stěn a) první typ – dvě strany se dotýkají, b) druhý typ – dotýká se pouze jedna [36]

Podpěry

Jak již bylo několikrát řečeno, u většiny součástí se podpěry používají jako podpůrný prvek konstrukce, ale také umožňují vytvořit převislé díly. Jejich umístění záleží na konstruktérovi, avšak některé programy umí tuto funkci samostatně. Pro určení, zda je podpěr potřeba slouží pravidlo 30° , což je samonosná, neboli bezpečná zóna, kde podpěry být nemusí. Pokud je úhel natočení součásti menší než 30° od podložky, je třeba toto místo podepřít. Toto pravidlo platí jak pro vnější, tak i pro vnitřní podpěry, příklad tohoto řešení zobrazuje Obr. 25a). U vnitřního umístění je nutné také vyřešit jejich následné odstranění. Opět existuje několik způsobů jak s tímto problémem naložit. Jedním z nich je vytvoření přidavných děr tak, aby byl zajištěn adekvátní přístup. Je zde ale také řada řešení, kdy se jsme schopni zbavit přebytečných podpěr. Příkladem takového řešení může být prosté zaoblení rohu uvedené na Obr. 25b). Je třeba však stále brát v úvahu, že vodorovné plochy, trčící více jak 2 mm, budou stále potřebovat podepřít [35][38].



Obr. 25: a) Příklad umístění vnitřních podpěr, b) úprava pro snížení podpěr zaoblením [35]

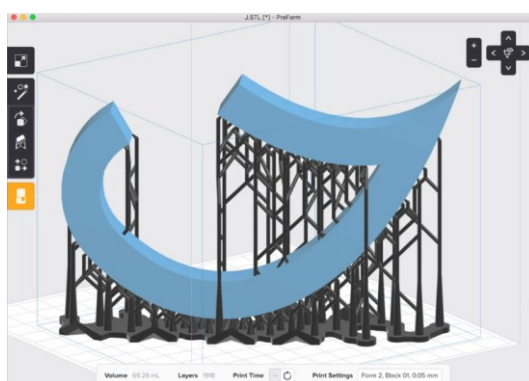
Odlehčení součástí (tisk skořepin a dutých dílů)

Běžným jevem při návrhu součástí je její odlehčování, tzn. jako plné díly se tisknou pouze součásti, které to nějakým způsobem vyžadují – funkční součásti. Odebráním určitého množství (tloušťky) materiálu se jednak ušetří čas potřebný pro tisk, ale i materiál. U takto řešených dílů lze také snadno předejít problémům vznikajícím při smršťování a vytvrzování větších tloušťek. Avšak je nutné dodržovat zásady týkající se tloušťek, aby nebyla narušena pevnost součástí. Navíc u těchto výtisků je potřeba

přidat otvory pro odvod nevytvrzené pryskyřice. Ty musí být umístěny v nejnižším bodu modelu s průměrem alespoň 3,5 mm [35][36][37].

Převisy

Představují relativně malý problém a dají se jednoduše vyřešit pomocí přidavných podpěr, příklad součásti s převisy a správně navrhnutými podpěrami je uveden na Obr. 26. Pokud je nutný tisk bez podpěr, je doporučováno, aby jakékoli nepodepřené převisy měly maximální délku menší než 1 milimetr a sklon 19° od nejbližší vodorovné roviny [36][37].



Obr. 26: Správně vytvořené podpory modelu s převisy [37]

Reliéfy a rytiny

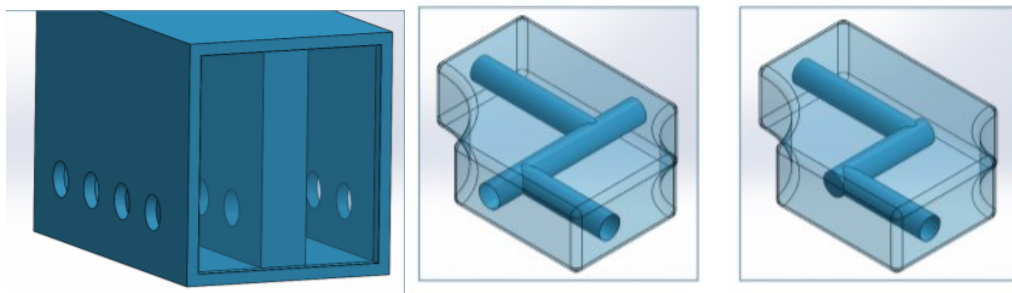
Při vytvoření jakéhokoli vystouplého prvku (reliéfu) a to včetně textu je nutno dbát na dostatečnou výšku, aby po vytisknutí byla zajištěna viditelnost těchto prvků. Tato výška by měla být aspoň 0,1 mm, ale doporučuje se i vyšší [36][37].

U prvků, které jsou zapuštěny, či ponořeny v součásti je nutno brát ohled jak na výšku, tedy vlastně hloubku zapuštění, tak i na šířku daného prvku (pro oba rozměry platí nejméně 0,4 mm). Pokud by byly rozměry menší, může dojít ke splynutí a spojení se zbytkem součásti [36][37].

Otvory

U otvorů menších než 0,5 mm hrozí jejich uzavření v průběhu tisku, proto je lepší volit větší rozměry. Pro prášky je lepší otvory vytvořit ještě větší. Mezní hodnotou je v tomto případě 1,5 mm. Pro uzavřené dutiny je vhodné volit, co největší průměry

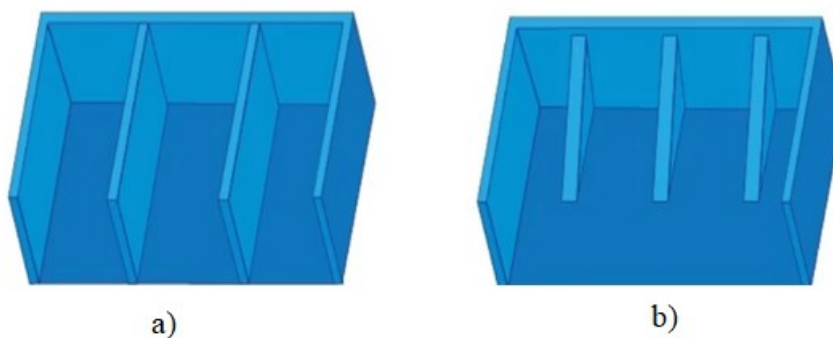
vnějších otvorů, a to proto, abychom zbytkový prášek, či pryskyřici byli schopní po tisku z dutiny odstranit [37].



Obr. 27: Příklad provedení uzavřené dutiny a vnitřních kanálků [39]

Žebra (klíny)

Pro zpevnění stěn a zabránění rizika vzniku trhlin se používají žebra nebo klíny viz. Obr. 28. Obecně by tyto prvky měly snížit potřebu dalších podpůrných členů. Pro svou správnou funkci je doporučeno, aby tloušťka žeber byla menší než tloušťka stěn (cca 60% tloušťky stěn) a je vhodné se vyhnout jejich křížení, aby nedošlo k narušení celistvosti a tím i snížení požadovaného účinku. U klínů je vhodné, aby jejich výška byla menší než výška připevněné stěny (max. 95 % výšky stěny) [37].



Obr. 28: Jako a) je zde uveden příklad žeber, b) je příkladem užití klínů [37]

Napojení součástí (skořepinových)

Vytvoření co nejvíce podpůrných prvků je zásadní pro zvýšení pevnosti celé konstrukce. Je také důležité, aby tyto spojovací prvky měly co největší vzájemnou dosedací plochu, pro co největší opření. V mnoha případech je, ale velice obtížné odstranit přebývající materiál z výstupků pro šrouby, dlouhých otvorů a uzavřené

geometrie. Jednou z možností jak tento problém vyřešit je umístění těchto otvorů na vnější straně součásti tak, aby se otvory a výstupky daly následně vyčistit. Doporučeno je přidávat výstupky každých 12,7 mm, ale ne v každém případě se toto řešení hodí a tak výsledný design záleží na samotné součásti a její konstrukci. Na Obr. 29 lze vidět příklad rozvržení těchto prvků [38][39].



Obr. 29: Příklad vhodně umístěných podpor a spojení pro šrouby [39]

5 Aditivní technologie v automotive

V současnosti je kromě kvality, preciznosti a rozumné ceny vyrobených dílů požadovaná také rychlost výroby. V případě 3D tisku by mohly některé z uvedených technologií nahradit jiné procesy nebo minimálně pomoci urychlit samotnou výrobu a zároveň snížit cenu. To může být dosaženo snížením počtu operací potřebných k výrobě samotného dílu (například detailní výroba pomocí SLS, DLP, kdy nebude potřeba zařadit proces obrábění daného dílu) nebo vhodnou kombinací s ostatními technologiemi. Nelze však říci, že by v dnešní době 3D tisk nějakým způsobem byl nasazován v sériové výrobě, protože rychlost konvenčních technologií stále předčí rychlost výroby 3D tištěných součástí. To předurčuje tyto metody výroby především k prototypové výrobě, či vývoji nových součástí a celků, které teprve budou procházet testováním. Rovněž se těchto metod dá využít ve výrobě součástí do starších automobilů, kdy je pro automobilky drahé udržovat a vyrábět nástroje a formy pro automobily, které už nejsou zařazeny v masové výrobě. Předpokládá se, že v této oblasti najde 3D tisk daleko větší uplatnění než v sériové výrobě. Naopak využití AM metod ve větším množství, lze nalézt při výrobě přípravků a upínacích zařízení, což umožňuje automobilkám převést výrobu těchto dílů z externí na vlastní pomocí 3D tisku. V současnosti se pro tuto možnost rozhodla americká automobilka Ford a 3D tištěné přípravky použila pro výrobu svého nového Focusu. Koncern Volkswagen si obdobně vyrábí tyto nástroje a podle vyjádření VW v roce 2018 takto ušetřili až 200 000 dolarů [40].

Oproti klasickým technologiím je výhodou 3D tisku možnost rychlé výroby prototypů pro testování, bez značných nákladů na výrobu. Pokud součást nevyhoví, je možné ji rychle a jednoduše upravit v CAD softwaru a poté nechat vyrobít další. To umožňuje lepší a větší možnosti pro designéry ve smyslu změny a úpravy designu a návrhu více variant v kratším čase, s vysokou přesností a důrazem na detail. Obdobně toto platí i pro konstruktéry, kteří mohou vyzkoušet více možností pro návrh s případnou pozdější modifikací. Hlavní výhodou, která staví metody AM na stejnou úroveň jako konvenční výrobní postupy, je ušetření nákladů na výrobu forem. Pokud se bavíme o plastových součástech, tak se jedná o formy pro vstřikovací lisy. Tyto formy musí být vyrobeny z ušlechtilých materiálů a jejich výroba zabere delší čas, než tisk dílu a případná chyba při výrobě, či úprava formy

může znamenat další finanční náklady a čas strávený nad její výrobou. U tisku stačí upravit model součásti, její umístění na podložce, případně podpěry a díl lze znovu tisknout. Kromě toho je zde také varianta, kdy jsme schopni tisknout i z více materiálů najednou. Kombinovat lze například plast a pryž nebo transparentní a neprůhledné materiály. Navíc lze vyrobit velice lehké konstrukce a součásti, přičemž požadované vlastnosti zůstávají nezměněny. Příkladem z praxe může být produkt firmy Materialise, kdy tato firma vyrobila pro automobilku Toyota prototyp sedadla na Obr. 30, který vykazoval hmotnost o 75% nižší než sedadlo vyrobené klasickou technologií [41][42][43].



Obr. 30: Prototyp sedadla pro automobilku Toyota [43]



Obr. 31: Součásti vhodné pro 3D tisk [40]

Metoda SLA je hojně využívána napříč celým spektrem průmyslu pro různé aplikace. Například firma Protofab vyrobila několik prototypů pro testování pro čínskou automobilku Great Wall Motors. Přičemž v tomto testu shrnula poznatky a porovnání s výrobou plastového krytu motoru pomocí technologie obrábění. Výsledkem bylo, že CNC obrábění a celý proces výroby jednoho dílu vyžadoval 25 jednotlivých částí, které bylo nutno poté slepit dohromady, a byly použity tři různé obráběcí nástroje. Konečná obráběná součást byla navíc obrobena z bloku o hmotnosti 27 kg, což se nedá srovnávat s minimálním odpadem tištěného dílu [41].



Obr. 32: Porovnání a) obrobený díl a b) jednoduchý tištěný díl [41]

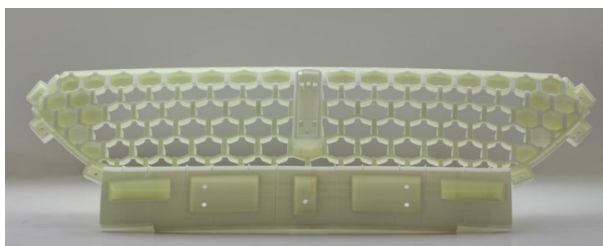
Dalším místem pro aplikaci tohoto typu tisku jsou komponenty, které se vyskytují v různých částech interiéru automobilů. V praxi to mohou být ventilační mřížky, páčky klik, rámečky displejů atd. Kromě menších součástí se pomocí SLA dají tisknout i rozměrnější výrobky umožňující následně povrchovou úpravu, broušení a lakování. Jako příklad lze uvést přední nárazník, kryt motoru nebo vnitřní plastové kryty sloupků (Obr. 33, 34 a 35). Výhodné je, že tyto rozměrově větší výtisky se dají vyhotovit jak v několika menších kusech, které se dají poté spojit dohromady, tak i jako jednolitě součásti, které lze po začištění, úpravách a dotvrzení ihned použít. Možností technologie SLA je také tisk transparentních součástí, tohoto se využívá při výrobě světel. SLA tiskem sice nejsme schopni bez dalších úprav přímo vytvořit plně transparentní součást. Ovšem využití tisku k tvorbě modelu pro zaformování dílu a poté následné odlití součásti se jak pro SLA, tak i pro DLP jeví jako daleko užitečnější a smysluplnější aplikace v průmyslu. Navíc tento postup ušetří čas a není nutné mít přímo originální součást, ale lze využít 3D programů k tvorbě jejího modelu. Při výrobě pomocí tohoto způsobu 3D tisku lze spoléhat také

na estetické vlastnosti, které může výroba pomocí SLA tiskáren nabídnout. Je běžné používat tento způsob na tisk dílů se zvýšeným požadavkem na estetiku a zároveň přesnost výrobků [41].

Co se týče metody DLP, její použití je značně obdobné jako u metody SLA, protože rozdílem mezi technologiemi je prakticky pouze jiný typ vytvrzování fungující na podobném principu. S tím rozdílem, že tato metoda je více výhodná vzhledem k tisku jedné vrstvy průřezu najednou, a tím je tiskový čas kratší. To tento druh tisku předurčuje jako vhodný typ pro zařazení do výroby požadující větší produktivitu. Tato skutečnost by mohla znamenat, že metoda DLP by v praxi snadno uplatnila své přednosti například v interiérových částech automobilů a to i vzhledem k detailům, které tyto tiskárny umožňují vyrobit. Typickým příkladem takovýchto výrobků mohou být obdobně jako u SLA ovládací tlačítka klimatizace, či podobné drobné díly ovládání displejů, rádií, páčky ovládání blinkrů, stěračů nebo tempomaty, potažmo možnost tak jako u SLA vyrobit větší celky jako středový panel, či části palubní desky. 3D tisk touto metodou navíc může umožnit tak jako předchozí technologie personalizaci jednotlivých částí a doplňků.



Obr. 33: Panel levých předních dveří [41]



Obr. 34: Struktura masky chladiče [41]



Obr. 35: Tisk předního nárazníku pomocí SLA [46]



Obr. 36: Pomocí SLA lze také tisknout transparentní součásti nebo lze SLA použít k zaformování a dále odlítí[44][45][47]

Vlastnosti metody SLS jsme schopni využít pro výrobu obdobných součástí jako SLA, či DLP. Avšak tato metoda se i kvůli používání pevného materiálu jeví jako vhodná i pro odlišné aplikace než předchozí technologie. Jako příklad lze uvést tvarově složité díly, kde bychom pomocí metody SLA a DLP museli použít velké množství podpěr, nebo díly s vnitřním otvorem. Rozdílem je nejen využití práškového materiálu, ale i možnost vhodně plnit tyto materiály jinými, pomocí kterých jsme schopni upravit vlastnosti původního na námi požadované. V případě SLS lze navrhnout jednoduché, komplikované konstrukce s různými tloušťkami stěn. V současnosti například automobilka BMW používá SLS tisk pro výrobu komponent upravených dle požadavků a představ zákazníka viz. Obr. 37b) a 38. Takto vzniká například palubní deska a kryty přihrádky u spolujezdce [42].



Obr. 37: Vytisknuté vzduchové potrubí a), horní kryt přihrádky spolujezdce b) [42][48]



Obr. 38: Estetické prvky interiéru (napodobení dřevěných prvků) [42]



Obr. 39: Lakovací masky [49]

Použití technologií AM je vhodné zejména při prototypové výrobě, proto se už i dnes v široké míře tyto metody aplikují v motorsportu. Švýcarská stáj formule jedna Alfa Romeo Sauber využívá metody AM (především SLA a SLS) k tisku součástí testovacích modelů, zmenšených na 60% skutečné velikosti, pro testování aerodynamických prvků ve větrném tunelu. Jedná se o přítlačná křídla, potrubí, odpružení a kryty motorů. Vývoj této stáje došel až tak daleko, že si sami navrhli

a vyrobili prášek (*Sauber Engeneering*), který aplikují na díly o vysoké tuhosti a nízké hmotnosti [50].



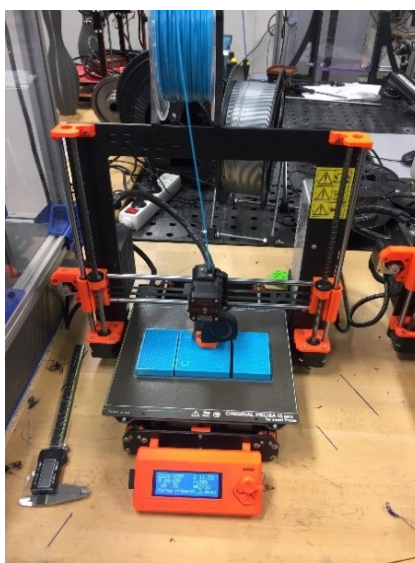
Obr. 40: Testovací součást pro monopost Alfa Romeo Sauber [50]

6 Aplikace DLP tisku v automobilovém průmyslu

Praktická část této bakalářské práce se bude zabývat návrhem a tiskem vybraných interiérových dílů automobilu a následným srovnáním DLP technologie s odléváním součástí. Tisk bude probíhat pomocí tiskáren, kterými je vybavena dílna katedry materiálů a technologií pro automobilový průmysl. Jedná se o DLP tiskárnu společnosti Prusa Original Prusa SL1 a FDM tiskárnu Original Prusa i3 MK3S+, která bude využita na tisk formy pro odlévání zvolené součásti.



Obr. 41: DLP tiskárna Original Prusa SL1

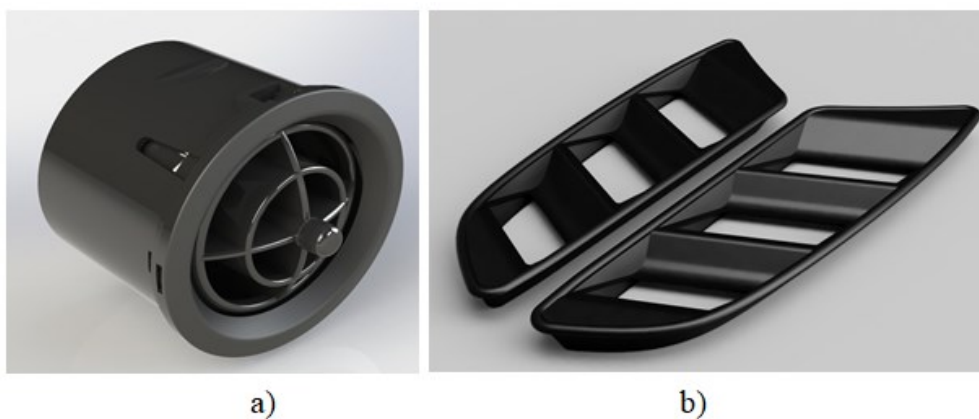


Obr. 42: FDM tiskárna Original Prusa i3 MK3S+

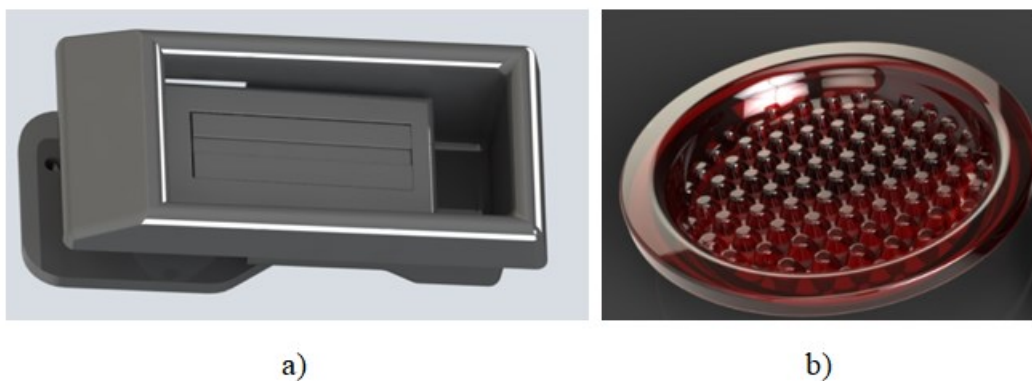
6.1 Konstrukční část

Navržení součásti pro praktickou část

Pro tisk pomocí DLP tiskárny jsou vhodné pouze prvky menších rozměrů, to je dáno hlavně velikostí pracovní plochy, jež je u tohoto typu zařízení o velikostech $120 \times 68 \times 150$ mm. Proto bylo navrženo několik komponent různé komplexnosti a různého využití, které najdou v interiéru vozidla. Při volbě těchto součástí bylo nutno brát v potaz jednak jejich celkové rozměry, ale také to, zda bude některý z návrhů vhodný k odlití pomocí pryskyřice a porovnání s tisknutými vzorky. Z těchto návrhů byly nakonec pro zpracování vybrány součásti z volně dostupných internetových zdrojů, které byly následně upraveny pro naše podmínky v programu *SolidWorks* a také vlastní navržená sestava. Jedná se o výstup ventilace na palubní desce na Obr. 43a), sestávající se ze tří částí, a to mřížky, pouzdra a jistícího kroužku. Dalším vybraným dílem byly mřížky výdechů karoserie na Obr. 43b). Následně pro porovnání transparentních vlastností bylo zvoleno sklíčko světla automobilu na Obr. 44b). Všechny výše popsané komponenty byly převzaty a dále upraveny pro rozměry a možnosti naší tiskárny. Vlastní navrženou sestavou byla vnitřní klika i s rámečkem vozu Škoda Rapid 130 na Obr. 44a).



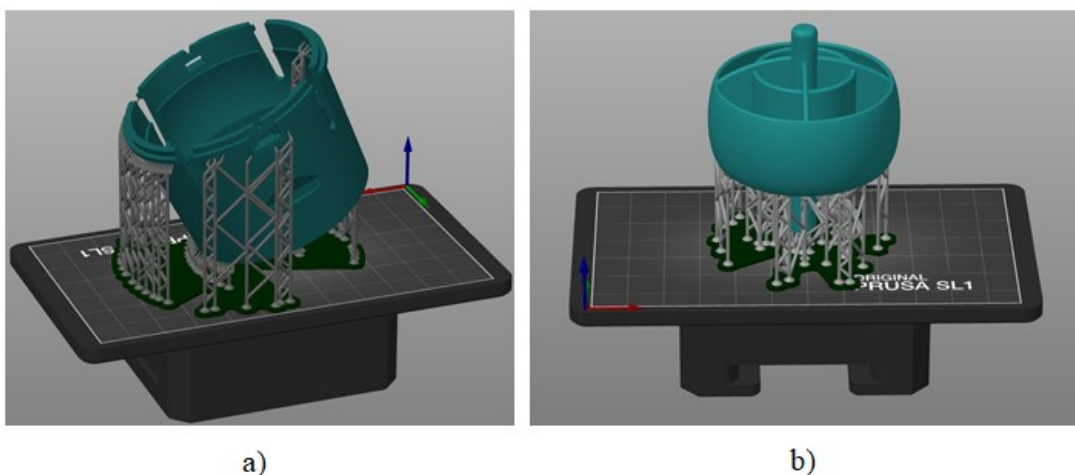
Obr. 43: a) Výstup ventilace na palubní desce [51], b) mřížka výdechů na karoserii [52]



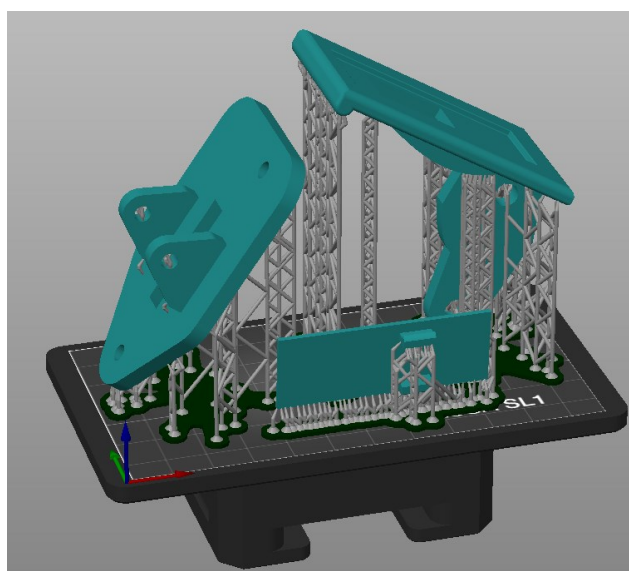
Obr. 44: a) Sestava vnitřní kliky Škoda Rapid 130, b) zadní sklíčko světla [53]

6.2 Příprava modelů pro tisk

K provedení tisku bylo nutno nejdříve součásti připravit. Pro tyto účely posloužil program *PrusaSlicer*. V tomto programu došlo k vytvoření podpěr a umístění dílů na tiskovou plochu. Generování podpěr probíhá v programu automaticky při rozvrstvení, ale ve většině případů je nutno podpěry editovat ručně. Jedná se především o odstranění podpěr, které zasahují mimo tiskovou plochu a dále také jejich přidání do kritických míst. Jejich návrhy pro modely této bakalářské práce lze sledovat na obrázcích níže a v příloze G. Umístění a velikost natočení v jednotlivých osách je nutno volit tak, aby nedošlo k přilepení modelu na tiskovou plochu a zároveň, aby modely splňovaly základní předpoklady zmíněné v kapitole 3.1 a výzkumu mechanických vlastností SLA (DLP) tisku. To zahrnuje co největší natočení blížíící se 45° od podložky, aby výtisky dosahovaly vyšších mechanických vlastností (pevnosti). Ne u všech se bylo možné těchto doporučení držet, a to vzhledem k jejich rozměrům, či deformacím, které při tisku mohou vznikat. Určitou nevýhodou mohly být navíc rozměry, které mírně přesahovaly přes podložku, a tak musela být sestava výstupu ventilace zmenšena v *PrusaSliceru* na 90 % svých původních rozměrů a mřížka výdechů karoserie na 70 %. U ostatních komponent rozmístění, ani orientace nebyly problémem a řídily se zásadami ve výše zmíněné kapitole, navíc u sestavy vnitřní kliky Škoda Rapid 130 byl zvolen tisk tří součástí najednou, jejich rozmístění lze pozorovat na Obr. 46.



Obr. 45: Příprava modelů pro tisk na obrázku a) pouzdro a b) mřížka



Obr. 46. Návrh tisku 3 komponent najednou

6.3 Průběh tisku

Před tiskem ještě proběhla příprava tiskárny v podobě očištění pracovní plochy a spodní strany nádržky. Dalším krokem bylo připevnění nádržky pro resin a tiskové platformy na těleso tiskárny. Následně se zvolila v nabídce ovládání tiskárny funkce kalibrovat nádržku (zaparkovat nádržku) a zaparkovat platformu, tyto funkce nastaví obě části tiskárny do počáteční polohy. Po přípravě tiskárny mohla být nádržka naplněna vybranou pryskyřicí pro tisk, zavřen ochranný kryt a v nabídce ovládání zvolen model. Velkou výhodou, co se týče volby materiálů je, že v programu použitým pro přípravu modelů (*PrusaSlicer*) lze nastavit přímo použitý materiál. Pomocí této funkce si program sám vypočítá potřebné množství pryskyřice,

přibližnou dobu tisku a při zvolení takto nastaveného modelu k tisku si tiskárna nastaví parametry nutné k vytvrzení tohoto typu materiálu.



Obr. 47: Ovládací rozhraní tiskárny

Jako první byl tištěn zajišťovací kroužek z tvrdé pryskyřice firmy Prusa Research, která je vhodná pro detailní, rychlý tisk a uplatnění najde u modelů vyžadujících pevnost a odolnost. Mechanické vlastnosti tohoto materiálu jsou uvedeny v příloze H. Tisk tohoto dílu trval přibližně 6 hodin. Po vytisknutí byl výtisk očištěn ponořením v isopropanolu na cca 5 minut, tak aby došlo k odstranění přebytečné pryskyřice a očištění součástí. Dále byly odstraněny podpěry a model byl vložen do UV vytvrzovací pece na 10 minut. Vyjmutý výtisk krátce po dokončení a jeho přípravu na vytvrzování lze pozorovat na Obr. 48.

První vzorek však, vzhledem k špatnému návrhu podpěr, vykazoval mírné deformace (zvlnění), způsobené gravitací, na pohledové straně. Proto bylo rozhodnuto o tisku druhého vzorku se změnou natočení modelu rovnoběžně s deskou. Tím došlo k změně rozvržení podpěr a zkrácení tiskového času na dvě a půl hodiny. Pro tento druhý vzorek byl použit resin stejného typu, jehož vlastnosti kromě zbarvení jsou totožné s předchozím typem.



Obr. 48: Vytisknutý model a vytažený z tiskárny



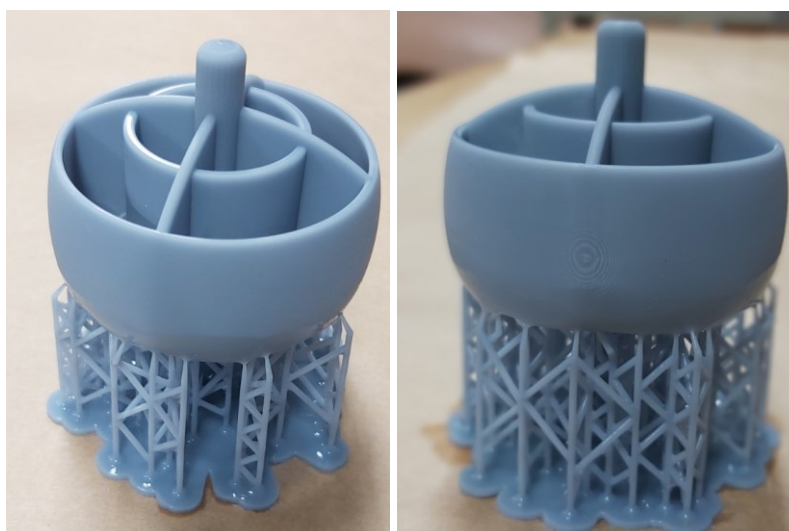
Obr. 49: Kroužek uvolněný od podpěr a připraven na vytvrzení

Druhým tištěným dílem bylo pouzdro sestavy výstupu ventilace, které zajišťuje celé její spojení dohromady. Tento model byl problematický především kvůli svým rozměrům, které se těsně vešly na pracovní desku i při zmenšení rozměrů na 90%. Natočení bylo zvoleno na 35 stupňů a to vzhledem k výšce součásti, která by se při vyšším natočení nevešla do tiskového prostoru. Materiálem pro tisk byl opět zvolen tvrdý resin společnosti Prusa Research a samotný tisk trval 8 hodin. Po vyjmutí z tiskárny došlo opět k uvolnění modelu z podložky, očištění v isopropanolu a odstranění podpěr. Dále se součást vložila do vytvrzovací pece stejně jako předchozí díl na 10 minut.



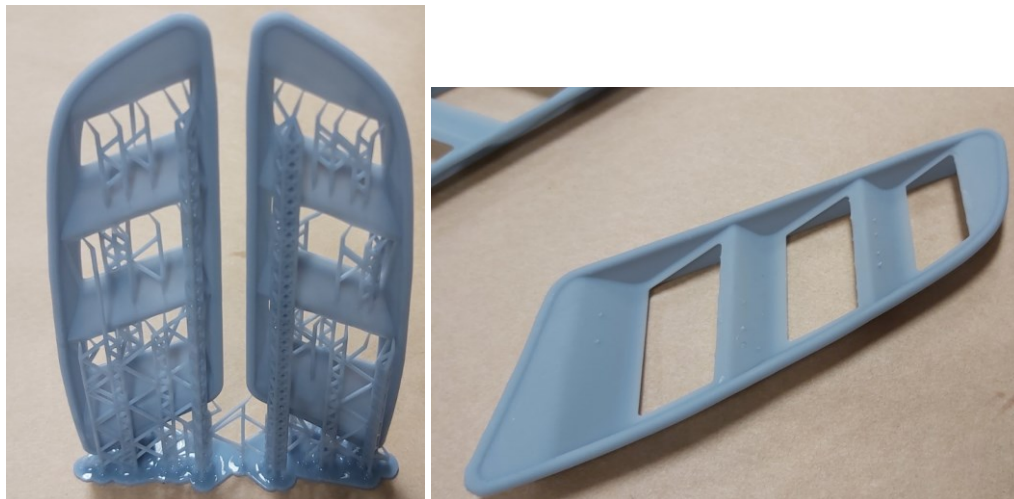
Obr. 50: Již vytisknuté a uvolněné pouzdro od podpěr.

Dále byla tisknuta mřížka ventilace, která je ze tří tisknutých dílů této sestavy tvarově nejsložitější, a tak zde byla reálná možnost vzniku jakýchkoliv vad. Kvůli tomuto se musel klást důraz na kvalitní umístění podpěr a jejich dostatečný počet. Tisk trval 10 hodin. Tak jako u předchozích dílů byl nejdříve model po vytisknutí vyjmut z tiskárny, očištěn, uvolněn od podpěr a poté vytvrzen v peci na 10 minut. Tato doba představuje optimální čas vytvrzení tak, aby se dalo se součástí pracovat, aniž by došlo s další manipulací k jejímu výraznému poškození. I zde se nejdříve uvažoval tisk s natočením o určitý úhel, ale nakonec i vzhledem k jednoduššímu umístění podpěr byl zvolen opět tisk rovnoběžně s podložkou.



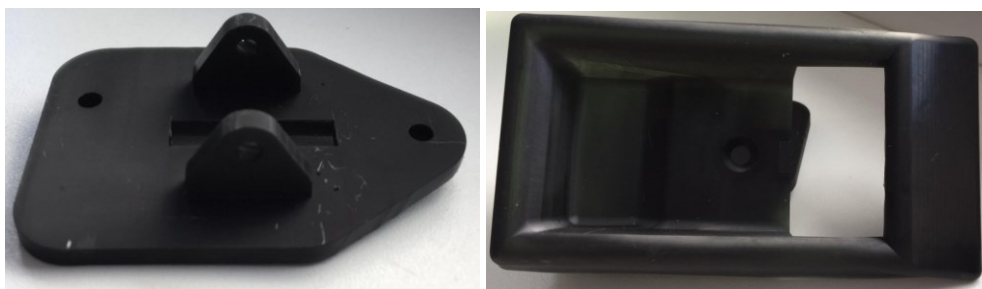
Obr. 51: Vytisknutá mřížka výstupu ventilace

Tisk výdechů karoserie trval nejdéle (18 hodin), a to vzhledem k tomu, že čas tisku se zvyšuje s výškou tisku v ose Z. Další postup byl obdobný jako u předchozích modelů.



Obr. 52: Ukázka výdechů po tisku vlevo a poté po odstranění podpěr

Následně proběhl tisk poslední sestavy, a to navržené vnitřní kliky pro automobil Škoda Rapid 130. U tohoto tisku bylo nakonec rozhodnuto o rozvržení tří dílů sestavy na pracovní plochu, tzn., že byly tisknuty tři součásti najednou. Toto rozvržení a celkově umístění více dílů na podložku pro jeden tisk je výhodné z hlediska času, a to protože jak už bylo řečeno výše, doba tisku se zvětšuje s výškou modelu v ose Z. V tomto případě to znamená, že je jedno, kolik součástí bude na pracovní ploše umístěno, záleží na tom, jak vysoké budou. Samozřejmě je nutno brát v potaz spotřebu pryskyřice, která musí být v případě potřeby doplněna. Tento tisk trval 9 hodin a po vytisknutí proběhl stejný postup jako u přechozích součástí. To zahrnovalo opatrné odstranění podpěr, případně odstranění spojení mezi modely, očištění všech výtisků a dotvrzení v UV stanici. Rámeček musel být vzhledem k svojí velikosti, která je skoro stejná jako tisková plocha, vyroben samostatně. U kliky, držáku a rámečku bylo dotvrzení zvoleno na 20 minut. Delší čas dotvrzení byl zvolen, protože tloušťka materiálu je v některých místech i dvakrát větší než u předchozích modelů.



Obr. 53: Vytisknutý držák kliky a rámeček



Obr. 54: Klika se zasazenou krytkou



Obr. 55: UV vytvrzovací stanice

Posledním tištěným dílem bylo sklíčko světla automobilu. Tisk tohoto dílu trval 9 hodin. Rozměry součásti byly zvětšeny na 150% své původní velikosti. Pro tisk byl použit červený transparentní resin, jehož vlastnosti jsou shodné s předchozími viz. příloha G. Sklíčko sice po tisku je průhledné, ale časem na

vzduchu zoxiduje a průhlednost bez úprav je velice špatná, proto je tento model vhodný pro následné zaformování a odlití z transparentní pryskyřice, u které by k tomuto jevu dojít nemělo.



Obr. 56: Vytisknuté sklíčko z transparentní pryskyřice

7 Odlévání součástí

V kapitolách níže jsou popsány možné způsoby odlévání pryskyřic do silikonových forem. Pro odlití byly vybrány součásti mřížka sestavy výstupu ventilace na palubní desce a sklíčko světlometů.

7.1 Mřížka ventilace

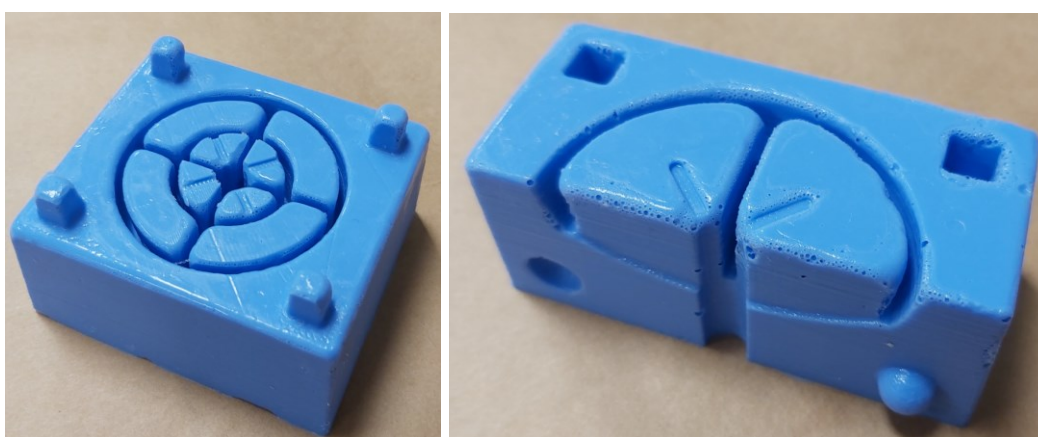
Vzhledem k tomu, že odlití pryskyřice mělo probíhat do silikonové formy, mohly být zvoleny dva způsoby výroby těchto forem. Pro mřížku na Obr. 51 s ohledem na její složitost byla vytvořena třídílná forma skládající se z jednoho spodního a dvou horních dílů viz. Obr. 58. Třídílná forma byla zvolena, protože při použití dvoudílné by mohly vzniknout problémy při výrobě silikonové formy a dále také kvůli umístění dělicí roviny, která neleží přesně v největším průřezu součásti. Dělicí rovina byla posunuta mimo největší průřez, kvůli vnitřnímu kruhu, u kterého by nemuselo dojít při umístění dělicí roviny v místě největšího průřezu k úplnému zalití a došlo by tedy k znehodnocení součásti. K zabránění tohoto jevu byly navíc do dělicí roviny přidány technologické kanálky pro lepší plnění.

Postup návrhu forem probíhal tak, že nejdříve došlo k návrhu finální silikonové formy, pro kterou byla následně vyrobena forma na FDM tiskárně Original Prusa i3 MK3 z materiálu PETG. Do vytisknuté formy byl odlit silikonový kaučuk Lukopren N 1522.

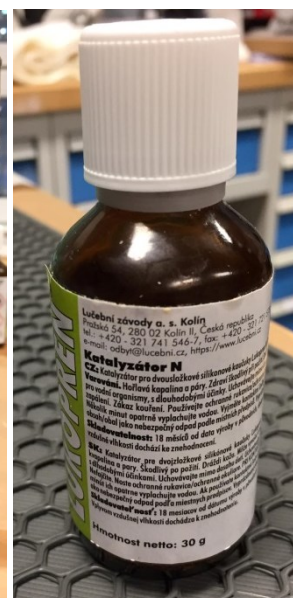
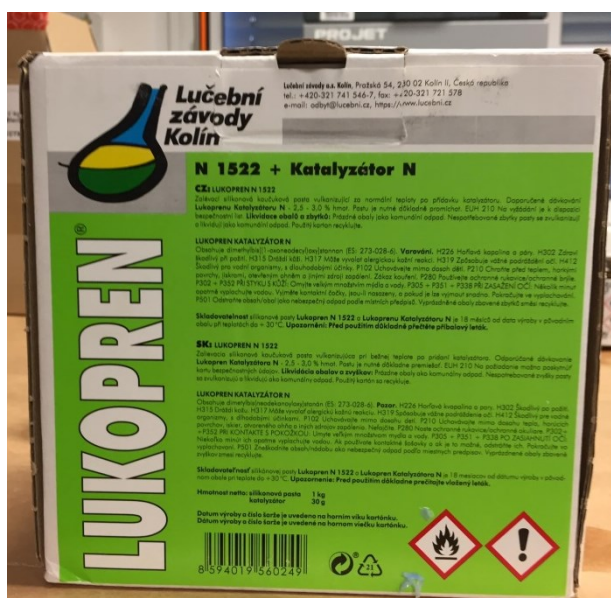
Odlévání silikonové formy probíhalo tak, že se nejdříve na vytisknutou formu z PETG nastříkal lak proti vniknutí silikonu do vrstev formy. Následně se podle váhy formy v programu Solidworks navážil kaučuk a dle technického listu viz. příloha I byl přidán katalyzátor (v technickém listu se udává 2,5-3 g na 100 g kaučuku). Po důkladném promíslení směsi došlo k odlití formy, její vytvrzení trvalo cca 6 hodin.



Obr. 57: Část formy vytisknutá z PETG

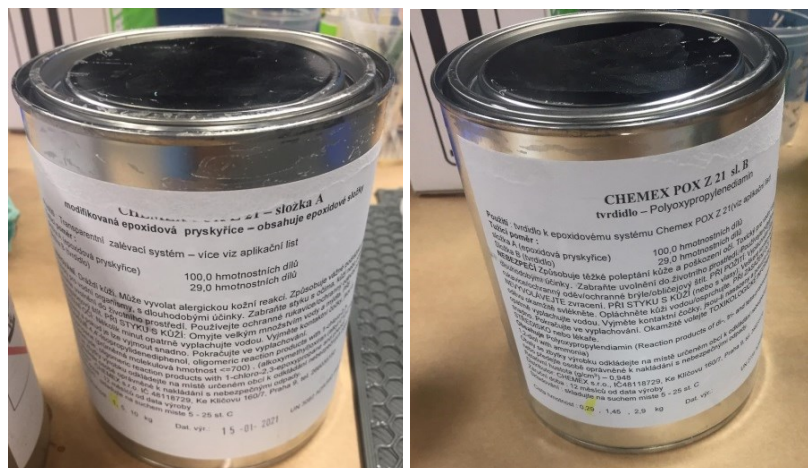


Obr. 58: Odlitá silikonová forma



Obr. 59: Silikonový kaučuk Lukopren 1522 s katalyzátorem N

Po vyjmutí silikonové formy mohla být následně odlita samotná součást z průhledné dvousložkové pryskyřice CHEMEX POX Z 21. Odlévací směs musela být opět nejdříve namíchaná v poměru 100 hm. % složky A ku 29 hm. % složky B viz. příloha J. Proto bylo do 50g složky A přimícháno 14,5 g složky B. Po důkladném promíchání, byla směs vlita do silikonové formy. Vytvrzení pryskyřice trvalo více jak 48h, které jsou uvedeny v technickém listu v příloze J.



Obr. 60: Složky A a B odlévané pryskyřice

Výsledek odlití však nebyl uspokojivý a to kvůli špatnému návrhu formy, kdy i vzhledem k více dělicím rovinám došlo k úniku pryskyřice z formy, tím se odlila pouze spodní část mřížky na Obr. 61. Navíc při pozorování lze sledovat jasně viditelné krokování vrstev a to i přesto, že na formu vytisknout na FDM tiskárnu z materiálu PETG byl nanesen lak, který měl zabránit vniknutí silikonu do jednotlivých vrstev.



Obr. 61: Nepovedený odlitek mřížky

7.2 Sklíčko světlometů

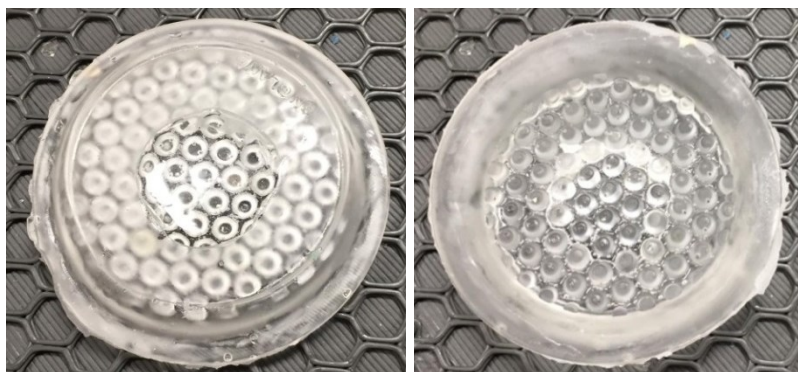
U tohoto modelu byla zvolena odlišná metoda zaformování, konkrétně zalití součástí pomocí silikonu. Nejdříve byla nalita do kádě vrstva silikonu o hmotnosti cca 250 g a výšce 1-1,5 cm, do které byla vložena a vtlačena polovina výtisku sklíčka, a poté se silikon nechal vytvrdnout. Po vytvrdnutí jedné poloviny formy se na tuto část nanese tenká vrstva Lukopren Separátoru pomocí štětce a následně se model opět zalil další vrstvou silikonu, obdobně vysokou jako první část formy. Každá část formy tvrdla při pokojové teplotě opět cca 4-6 hodin.

Po vytvrzení byly obě části formy opatrně vyjmuty z odlévací kádě. Dalším krokem bylo vytvoření vtokového kanálku a zafixování formy proti pohybu. Po těchto finálních přípravách formy došlo opět, tak jako v předchozí kapitole, k namíchání směsi pryskyřice. V tomto případě se použilo 40g složky A a 11,8g složky B a směs se nechala tvrdnout dva dny, což odpovídá technickému listu v příloze J.



Obr. 62: Lukopren separátor a první polovina formy s vrstvou separátoru

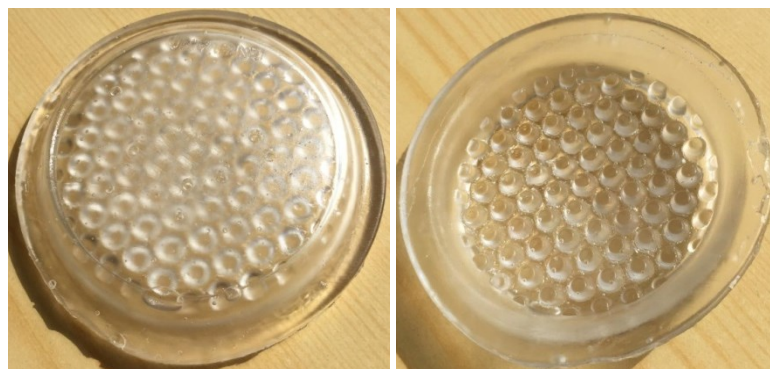
Avšak i u této metody došlo k úniku pryskyřice, sice byl v daleko menším rozsahu, stále se ale jednalo o nežádoucí efekt. Na Obr. 63 lze vidět, jak únik vytvořil dutinu v prvním odlitku. S ohledem na tyto skutečnosti bylo provedeno několik dalších odlitků s upraveným technologickým postupem a formou. U posledního vzorku byly tyto nedostatky odstraněny a výsledek lze sledovat na Obr. 64. Na Obr. 65 je odlitek již po broušení a očištění.



Obr. 63: První odlitek sklička s dutinou na straně lícího otvoru



Obr. 64: Poslední odlitek již bez dutiny



Obr. 65: Třetí vzorek po broušení a očištění

8 Zhodnocení dosažených výsledků

Na základě informací získaných v rešeršní části práce je nutno konstatovat, že užití aditivních metod výroby v automobilovém průmyslu se ve většině případů netýká sériové výroby, kde stále převládají například vstřikovací lisy. Jejich uplatnění nalezneme především v části prototypování, kusové výroby např. speciálních edicí automobilů anebo v případě součástí, které nelze vyrobit jinou technologií nebo by to bylo technologicky velice náročné.

Pokud bychom porovnávali jednotlivé technologie 3D tisku, zejména pak SLS a SLA (DLP), lze u technologií pracujících s pryskyřicí vyzdvihnout množství materiálů, které jsou dnes k dispozici. Tedy materiály tvrdé, zároveň však křehké, resiny flexibilní, odolné zvýšeným teplotám a pro speciální použití. Co se týče této práce, byly použity tvrdé pryskyřice různé barvy a optických vlastností. Proto bylo nutno u součástí menších tloušťek brát toto chování (křehkost) na zřetel a s výtisky pracovat opatrně, zejména pokud se jednalo o části sestavy, a bylo nutné je zkompletovat. Jako příklad lze uvést krytku kliky, jejíž tloušťka je v některých místech rovna jednomu milimetru. Navíc u výtisků z těchto materiálů je nutné počítat do budoucna s jejich křehnutím. Proto se ani nedoporučuje výrobky z těchto materiálů extrémně vystavovat slunečnímu záření bez dodatečných úprav. Aplikace dílů vyrobených pomocí metody SLS je naopak vhodná pro funkční prostředí. Příkladem takového užití může být výroba ozubení, různé nástroje, či jejich těla, přípravky a upínky. Tyto vlastnosti jsou dány používanými materiály a samotným způsobem výroby. U tohoto typu tisku se využívají polyamidové (nylonové) prášky a dále také plněné materiály.

Z dosažených výsledků praktické části lze vyhodnotit, že pomocí DLP (SLA) tiskárny jsme schopni vyrobit různě tvarově komplexní díly. Tuto skutečnost lze sledovat v kapitolách výše, kde bylo vybráno několik různě složitých dílů, a u všech proběhl tisk bez větších problémů. Avšak pokud chceme dosáhnout kvalitních výtisků, je nutné, aby konstruktér při návrhu nepodcenil přípravu před tiskem. V případě této práce se jednalo o umístění dané součásti na pracovní plochu, vytvoření dostatečného množství podpěr ve správné pozici a správné nastavení materiálu. Všechny tyto tři aspekty výrazně ovlivňují to, zda bude tisk povedený, či ne. Například při tištění zajišťovacího kroužku v kapitole 6.3, došlo k deformaci

v místě dotyku kroužku s podložkou. Defekt byl způsoben malým množstvím podpěr, které pak vyústilo v posuv nepodepřeného materiálu.

Při porovnání technologie DLP (SLA) a odlévání, které byly provedeny v praktické části práce, lze říci, že výroba pomocí tisku je méně náročná na čas než odlévání. V průměru se většina součástí tiskla cca 6-10 hodin (pokud bereme v potaz vhodně umístěné prvky na podložce) a jsme schopni vyrobit i více dílů najednou. Na rozdíl od odlévání, kde při tvorbě silikonové dvoudílné formy bylo nutno čekat celkem 12 hodin pro vytvrzení silikonu a následně dalších 48 hodin pro vytvrzení odlévací pryskyřice, a to vše pro jednu součást. Pokud bychom srovnávali první pracovní postup, tedy „výroba formy pro formu“ je nutno navíc přičíst čas FDM tisku, který se pohybuje kolem 10 hodin. Jistou nevýhodou odlévání by navíc mohla být i nutnost míchání jednotlivých složek pryskyřice a kaučukového silikonu s katalyzátorem v určitých poměrech. Naopak, v čem jednoznačně odlévání tisk předčí, je výroba průhledných dílů. Výrobu takových součástí jsme schopni dosáhnout s minimem dalších úprav a s kvalitním výsledkem. V této práci však vzhledem k použité technologii a materiálům nedosahovaly odlitky dostatečné transparentnosti. Předpokládanými činiteli odpovědnými za pouze částečnou průhlednost odlitků jsou možná nesprávná kombinace zvoleného silikonu a odlévací pryskyřice a dále také množství vzduchových bublin, které při správném postupu mají být odstraněny ve vakuové komoře. Navíc doporučením pro budoucí odlévání je vytvoření drážek, či těsnění při zaformování, tak aby použitá pryskyřice nemohla uniknout z formy, správně zvolit materiály pro zpracování a použít vhodnější technologické postupy výroby.

Po výrobě pomocí výše zmíněných metod je vhodné zařadit finální (dokončovací) úpravy. U tisknutých dílů se jedná hlavně o zabroušení výstupků, které byly vytvořeny po odstranění podpěr. Pokud bychom navíc chtěli použít výtisky v běžném prostředí je vhodné je chránit proti křehnutí vlivem slunečního záření. K tomu se používá běžné lakování, tedy nanesení základní, finální barvy a krycího laku. U transparentních modelů je, pro zajištění různých úrovní průhlednosti, možné využít několik metod. Jedná se o broušení a leštění (lapování), úprava minerálním olejem, nanesení vrstvy lesklého laku či speciální úprava pomocí povlaku z transparentní epoxydové pryskyřice. U odlitků se při použití správné technologie a materiálů předpokládá vynikající kvalita povrchu a v případě

průhledných dílů i plná transparentnost. I přesto však je nutné odstranit přebytečné otřepy, či výstupky vzniklé například vniknutím pryskyřice do části formy. Pokud bychom stejně jako v této práci nedosáhli u odlitků dostatečné průhlednosti, je možné využít obdobných úprav jako u výtisků, tedy broušení a leštění. Případně lze použít i jiných metod a to aplikování čističe plastů pro transparentní díly, ten částečně zvýší průhlednost, nebo aplikovat silikonového oleje k dosažení obdobného efektu.

Závěr

Práce se zabývala aplikací SLA, SLS a DLP aditivních metod výroby v automobilovém průmyslu. V teoretické části práce byly shrnuty dostupné informace týkající se principů, materiálů, základních doporučení a současný stav používání těchto technologií v automobilovém průmyslu. Praktická část se zabývala návrhem a tiskem dílů pomocí DLP tiskárny a následně odléváním pryskyřic do silikonových forem jako komparační technologie. Pro zpracování byly vybrány čtyři součásti. Oba procesy a to jak tisku, tak odlévání, jsou popsány v praktické části a zhodnoceny v kapitole 8. Výsledkem bylo vytisknutí zvolených dílů, ze kterých byly dva vybrány pro následné zaformování a odlití. Vytisknuté díly dosahovaly vysoké kvality povrchu s minimální viditelností jednotlivých vrstev. U odlévání došlo k vytvoření tří vzorků, přičemž u každého vzorku byla mírně upravená technologie. Požadovaného výsledku bylo dosaženo až u třetího vzorku, u kterého byly eliminovány nedostatky předchozích dvou. V kapitole 8 jsou také navrženy možné dokončovací úpravy obou procesů a úpravy postupu při odlévání.

Souhrnem celé práce je zjištění, že ačkoliv dochází stále k vývoji aditivních metod výroby, tak tyto metody dnes nemohou konkurovat v sériové výrobě konvenčním technologiím výroby plastů. To je způsobeno zejména produktivitou výroby, jež je u 3D tisku razantně menší než například u technologie vstřikování plastových dílů. Tento fakt se projevil časem výroby v praktické části, který se pohyboval v průměru od 6 až 10 hodin. Proto jsou popsány metody předurčeny hlavně k výrobě prototypů. V porovnání s odléváním, které bylo provedeno v praktické části se 3D tisk jeví jako podpůrná a levná technologie, která by mohla usnadnit výrobu modelů k zaformování, a to především v kusové výrobě.

Seznam obrázků

Obr. 1: Princip metody SLA.....	3
Obr. 2: Princip technologie SLS.....	4
Obr. 3: Princip SLS se dvěma prášky.....	5
Obr. 4: SLS tiskárna QLS 350.....	5
Obr. 5: Princip metody DLP.....	7
Obr. 6: Tiskárna DLP PHOTOCENTRIC LC MAGNA	7
Obr. 7: Údaje z datasheetu testované pryskyřice	9
Obr. 8: Výsledek výzkumu.....	9
Obr. 9: Změna vlastností vlivem různých dotvrzovacích časů	10
Obr. 10: Úprava povrchu pomocí nanesení povlaku z pryskyřice s finální fází úplně vlevo	11
Obr. 11: Porovnání materiálů vyrobených různou technologií (SLA, SLS a vakuové lití)	11
Obr. 12: Průběh přeměny	13
Obr. 13: Porovnání modulů ponořeného a opláchnutého vzorku.....	14
Obr. 14: Porovnání způsobů dotvrzení.....	14
Obr. 15: Příklady vytvrzovacích stanic	14
Obr. 16: Závislost napětí a deformace pro křivky s různou hustotou energie	16
Obr. 17: Orientace zkoušených vzorků	17
Obr. 18: Na snímku a) lze pozorovat, jak se odráží světelný paprsek při průchodu porézním materiálem, kde dochází k rozptýlení paprsku vlivem přechodu mezi dvěma prostředím plast/vzduch. Na obrázku b) vidíme sjednocení struktury pomocí pryskyřice, která umožňuje průchod světlu a tedy i transparentnost	17
Obr. 19: Průběh procesu úpravy prášku	18
Obr. 20: Různá čírost a zakalení vzorků s různými rozdíly indexu lomu světla mezi pryskyřicí a práškem	18
Obr. 21: Vznik možných vad při špatné orientaci.....	19
Obr. 22: Přilepení součásti vlivem velkého přirezu v ose z	20
Obr. 23: Správně naorientovaná součást	20
Obr. 24: Příklady napojení stěn a) první typ - dvě strany se dotýkají, b) druhý typ - dotýká se pouze jedna.....	21

Obr. 25: a) Příklad umístění vnitřních podpor, b) úprava pro snížení podpěr zaoblením	22
Obr. 26: Správně vytvořené podpory modelu s převisy	23
Obr. 27: Příklad provedení uzavřené dutiny a vnitřních kanálků.....	24
Obr. 28: Jako a) je zde uveden příklad žeber, b) je příkladem užití klínů	24
Obr. 29: Příklad vhodně umístěných podpor a spojení pro šrouby	25
Obr. 30: Prototyp sedadla pro automobilku Toyota	27
Obr. 31: Součásti vhodné pro 3D tisk	27
Obr. 32: Porovnání a) obrobený díl a b) jednodílný tištěný díl.....	28
Obr. 33: Panel levých předních dveří	29
Obr. 34: Struktura masky chladiče	29
Obr. 35: Tisk předního nárazníku pomocí SLA	30
Obr. 36: Pomocí SLA lze také tisknout transparentní součásti nebo lze SLA použít k zaformování a dále odlít	30
Obr. 37: Vytisknuté vzduchové potrubí a), horní kryt přihrádky spolujezdce b)	31
Obr. 38: Estetické prvky interiéru (napodobení dřevěných prvků).....	31
Obr. 39: Lakovací masky	31
Obr. 40: Testovací součást pro monopost Alfa Romeo Sauber	32
Obr. 41: DLP tiskárna Original Prusa SL1	33
Obr. 42: FDM tiskárna Original Prusa i3 MK3S+	33
Obr. 43: a) Výstup ventilace na palubní desce, b) mřížka výdechů na karoserii	34
Obr. 44: a) Sestava vnitřní kliky Škoda Rapid 130, b) zadní sklíčko světla	35
Obr. 45: Příprava modelů pro tisk na obrázku a) pouzdro a b) mřížka	36
Obr. 46: Návrh tisku 3 komponent najednou	36
Obr. 47: Ovládací rozhraní tiskárny	37
Obr. 48: Vytisknutý model a vytažený z tiskárny	38
Obr. 49: Kroužek uvolněný od podpěr a připraven na vytvrzení	38
Obr. 50: Již vytisknuté a uvolněné pouzdro od podpěr.	39
Obr. 51: Vytisknutá mřížka výstupu ventilace	39
Obr. 52: Ukázka výdechů po tisku vlevo a poté po odstranění podpěr.....	40
Obr. 53: Vytisknutý držák kliky a rámeček	41
Obr. 54: Klika se zasazenou krytkou.....	41
Obr. 55: UV vytvrzovací stanice	41
Obr. 56: Vytisknuté sklíčko z transparentní pryskyřice	42

Obr. 57: Část formy vytisknutá z PETG	44
Obr. 58: Odlitá silikonová forma	44
Obr. 59: Silikonový kaučuk Lukopren 1522 s katalyzátorem N	44
Obr. 60: Složky A a B odlévané pryskyřice	45
Obr. 61: Nepovedený odlitek mřížky	45
Obr. 62: Lukopren separátor a první polovina formy s vrstvou separátoru	46
Obr. 63: První odlitek sklíčka s dutinou na straně lícího otvoru	47
Obr. 64: Poslední odlitek již bez dutiny	47
Obr. 65: Třetí vzorek po broušení a očištění	47

Seznam tabulek

Tab. 1: Vlastnosti SLA tisku	2
Tab. 2: Vlastnosti SLS tisku.....	4
Tab. 3: Vlastnosti DLP tisku	6
Tab. 4: Porovnání vlastností transparentních materiálů	11
Tab. 5: Mechanické vlastnosti univerzální pryskyřice Formlabs.....	12
Tab. 6: Mechanické vlastnosti Elastic 50A	13
Tab. 7: Mechanické vlastnosti sintrovacích prášků.....	15
Tab. 8: Porovnání vlastností plněných prášků	16

Zdroje

- [1] Stereolitografie - 3D-tisk.cz. *3D-tisk.cz - Vše o 3D tisku a aditivní výrobě* [online]. Copyright © 2019 [cit. 08.11.2020]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/wiki/stereolitografie/>
- [2] GAGET, Lucia. *3D Printing Technology: SLA Vs SLS* [online]. Villejuif, Francie: Wevolver, 2020 [cit. 2020. 11. 08]. Dostupné z: <https://www.wevolver.com/article/3d.printing.technology.sla.vs.sls>
- [3] *Přehled technik využívaných při Rapid Prototyping: učební text* [online]. In: .LIBEREC, 2012, s. 71 [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: http://www.kvs.tul.cz/download/rapid_prototyping/P%C5%99ehled%20technik%20vyu%C5%BE%C3%ADvan%C3%BDch%20p%C5%99i%20Rapid%20Prototyping.pdf
- [4] 3D Printing | An Overview of 3D Printing Technologies. *TechPats – Technology Patent Services & Intellectual Property Consulting* [online]. Copyright © TechPats, All Rights Reserved [cit. 08.11.2020]. Dostupné z: <https://www.techpats.com/3d-printing-technologies-overview/>
- [5] *3D Printing Technology: SLA Vs SLS* [online]. The 3D Printing Industry, 2020 [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#04-processes>
- [6] SLS (Selective Laser Sintering) | cotu.cz. *3D tisk, výroba prototypů a sériová výroba* | cotu.cz [online]. Copyright © 2020 [cit. 08.11.2020]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/126/sls-selective-laser-sintering>
- [7] Types Of 3D Printers Or 3D Printing Technologies Overview #sls. *3D Printing from scratch* [online]. Copyright © 2020 [cit. 09.11.2020]. Dostupné z: <http://3dprintingfromscratch.com/common/types-of-3d-printers-or-3d-printing-technologies-overview/#sls>
- [8] 2020 SLS 3D Printer Buyer's Guide | All3DP Pro. *All3DP | World's #1 3D Printing Magazine* [online]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/best-sls-3d-printer-desktop-industrial/>
- [9] Aerosint - Selective Powder Deposition for AM. *Aerosint - Selective Powder Deposition for AM* [online]. Copyright © Copyright Aerosint SA [cit. 08.11.2020]. Dostupné z: <https://aerosint.com/>

- [10] Thermoplastic Printers - Nexa 3D. *3D Printers - Nexa 3D - additive manufacturing* [online]. Copyright © 2020 [cit. 09.11.2020]. Dostupné z: <https://nexa3d.com/3d-printers/thermoplastic-printers/>
- [11] Přehled technologií 3D tisku | dkmp Nový Jičín, Ostrava. *Kovovýroba, 3D tisk, konstrukce, vývoj | dkmp Nový Jičín, Ostrava* [online]. Copyright © [cit. 08.11.2020]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3d-tisku>
- [12] DLP a LCD 3D tisk | cotu.cz. *3D tisk, výroba prototypů a sériová výroba | cotu.cz* [online]. Copyright © 2020[cit.09.11.2020]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/148/dlp-a-lcd-3d-tisk>
- [13] GREGURIC, Leo. Digital Light Processing 3D Printing Explained. *Wevolver.com* [online]. Záhřeb, Chorvatsko: www.wevolver.com, 2019 [cit. 2020-11-09]. Dostupné z: <https://www.wevolver.com/article/digital.light.processing.3d.printing.explained>
- [14] Technologie DMD :: MEF. *Fyzika :: MEF* [online]. Copyright © Převzato z http[cit.08.11.2020].Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/print/1562-technologie-dmd>
- [15] Technologie projektorů a jejich kvality. *PCTuning - Titulní stránka* [online]. Copyright © 2009 [cit.09.11.2020].Dostupné z: https://pctuning.tyden.cz/hardware/monitory-lcd-panely/12213-technologie_projektoru_a_jejich_kvality?start=3
- [16] *Materiály a doplňky pro 3D tisk - filamenty - Materialpro3d.cz* [online]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/3d-tiskarny/photocentric-lc-magna/>
- [17] GRICOVÁ, Bc. Monika. *STEREOLITOGRAFICKÁ TISKÁRNA PRO VÝROBU BUNĚČNÉHO KULTIVAČNÍHO ZAŘÍZENÍ* [online]. Brno, 2019 [cit. 2020-11-09]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=195709&fbclid=IwAR0iOXWg3iZBbJsxcHip1lpk9TP81AKn1RNK1qwMi0WYXzVky_HSkwnXnrc. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.

- [18] CHANTARAPANICH, Nattapon, Puttisak PUTTAWIBUL, Kriskrai SITTHISERIPRATIP, Sedthawatt SUCHARITPWATSKUL a Surapon CHANTAWEROAD. Study of the mechanical properties of photo-cured epoxy resin fabricated by stereolithography process [online]. Hat Yai, 2012 [cit. 2020-12-21]. Dostupné z: <https://rdo.psu.ac.th/sjstweb/journal/35-1/35-1-91-98.pdf>. Prince of Songkla University.
- [19] SONG, Min Seop, Hae Yoon CHOI, Jee Hyun SEONG a Eung Soo KIM. Matching-index-of-refraction of transparent 3D printing models for flow visualization. Department of Nuclear Engineering, Seoul National University, Jižní Korea [online]. 12 December 2014 [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549314006785>
- [20] Guide to Clear 3D Printing | Formlabs. High Resolution SLA and SLS 3D Printers for Professionals | Formlabs [online]. Copyright © Formlabs [cit. 17.01.2021]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/3d-printing-transparent-parts-techniques-for-finishing-clear-resin/>
- [21] Index lomu světla – WikiSkripta. 301 Moved Permanently [online]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Index_lomu_sv%C4%9Btla
- [22] HAVEL, Ing. Petr. Význam indexu lomu skel a dalších materiálů. Glassrevue [online]. Hradec Králové: Polyconsult, 2002, (9) [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=709&cid=6.html>
- [23] Formlabs 3D Printing Resin Materials Library | Formlabs. *High Resolution SLA and SLS 3D Printers for Professionals* | *Formlabs* [online]. Copyright © Formlabs [cit. 09.11.2020]. Dostupné z: <https://formlabs.com/materials/engineering/>
- [24] (PDF) Understanding and Improving Mechanical Properties in 3D printed Parts Using a Dual-Cure Acrylate-Based Resin for Stereolithography. ResearchGate | Find and share research [online]. Copyright © 2015, American Association for the Advancement of Science. [cit. 08.12.2020]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/327805237_Understanding_and_Improving_Mechanical_Properties_in_3D_printed_Parts_Using_a_Dual-Cure_Acrylate-Based_Resin_for_Stereolithography

- [25] Form Wash and Form Cure: Automated Post-Processing | Formlabs. High Resolution SLA and SLS 3D Printers for Professionals | Formlabs [online]. Copyright © Formlabs [cit. 03.04.2021]. Dostupné z: <https://formlabs.com/post-processing/wash-cure/>
- [26] Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing | Formlabs. *High Resolution SLA and SLS 3D Printers for Professionals* | Formlabs [online]. Copyright© Formlabs [cit. 09.11.2020]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/#materials>
- [27] *3D Hubs | On-demand Manufacturing: Quotes in Seconds, Parts in Days* [online]. Copyright © 2020 3D HUBS B.V. All rights reserved. [cit. 09.11.2020]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sls-3d-printing/#materials>
- [28] PA 12 - PA2200: Nylon for Industrial 3D Printing | EOS GmbH. Redirecting to <https://www.eos.info/en> [online]. Copyright © EOS [cit. 16.11.2020]. Dostupné z: <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-plastic/sls-polymer-materials/polyamide-pa-12-alumide>
- [29] PA 3200 GF. Proto3000.com [online]. Vaughan, Ontario: proto3000 [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: <https://proto3000.com/materials/pa-3200-gf/#technicalspecifications>
- [30] Ultrasint® PA11 CF 3D printing material. Sculpteo.com [online]. Villejuif FRANCE: sculpteo [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/materials/sls-material/pa11-cf/>
- [31] Alumide 3D printing material. Sculpteo.com [online]. Villejuif FRANCE: sculpteo [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/materials/sls-material/alumide-material/>
- [32] KUNDERA, Czesław a Tomasz KOZIOR. Mechanical properties of models prepared by SLS technology [online]. 2018, 1.10.2018, , 1-8 [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5056275>

- [33] CAULFIELD, B., P.E. MCHUGH a S. LOHFELD. Dependence of mechanical properties of polyamide components on build parameters in the SLS process. Journal of Materials Processing Technology [online]. Galway, Ireland: National Centre for Biomedical Engineering Science, Department of Mechanical and Biomedical Engineering, National University of Ireland, 2006, 2.2.2007, 182(1-3), 477-488 [cit. 2021-02-02]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013606007886>
- [34] HIDENORI YAMADA, Toshiki NIINO. Transparentization of SLS Processed SMMA Copolymer Parts by Infiltrating a Thermosetting Epoxy Resin with Tuned Refractive Index [online]. Tokyo, Japonsko: The Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 2005, 9 [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/80058/2005-19-Niino.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [35] Design Guidelines for PerFORM| Stereolithography (SLA) at Materialise. Materialise | 3D Printing Innovators [online]. Copyright © Copyright Materialise [cit. 14.12.2020]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/manufacturing/materials/perform/design-guidelines>
- [36] 3D Hubs | On-demand Manufacturing: Quotes in Seconds, Parts in Days [online]. Copyright © 2020 3D HUBS B.V. All rights reserved. [cit. 14.12.2020]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-design-parts-sla-3d-printing/#designing-for-sla-printing>
- [37] How to Design Parts for SLA 3D Printing | All3DP. All3DP | World's #1 3D Printing Magazine [online]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/how-to-design-parts-for-sla-3d-printing/>
- [38] 3D Hubs | On-demand Manufacturing: Quotes in Seconds, Parts in Days [online]. Copyright © 2020 3D HUBS B.V. All rights reserved. [cit. 18.12.2020]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-design-parts-sls-3d-printing/#design>
- [39] Design Guide: Selective Laser Sintering (SLS) [online]. Ottobrunn, Germany: Xometry [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: https://cdn2.hubspot.net/hubfs/340051/Design_Guides/Xometry_DesignGuide_SLS.pdf

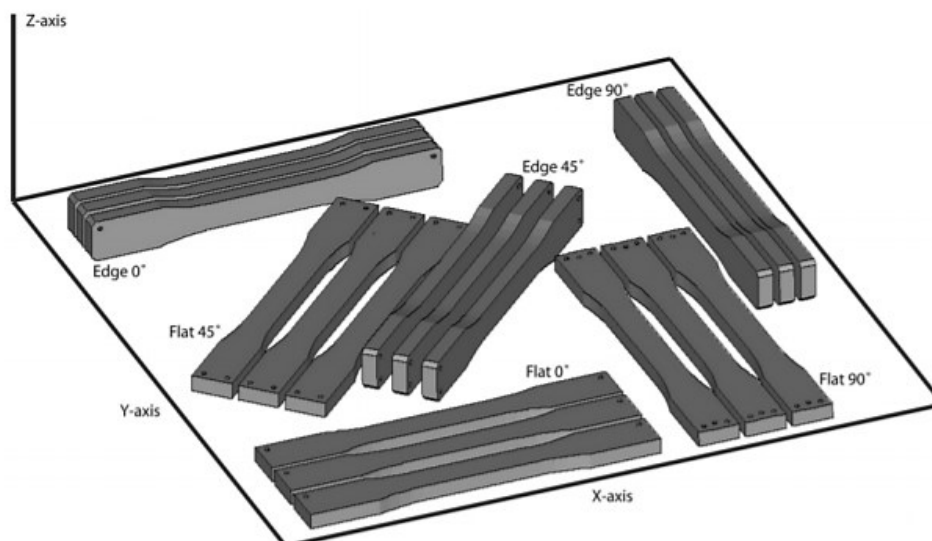
- [40] 3D Printing Automotive Applications – The Latest Projects | All3DP. All3DP | World's #1 3D Printing Magazine [online]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printing-automotive-applications-latest-projects/>
- [41] SLA 3D Printing in the Automotive Industry | Protofab. 3D Printers distributor in Plochingen Germany [online]. Dostupné z: <http://www.protofab.de/sla-3d-printing-in-the-automotive-industry/>
- [42] 3D Hubs | On-demand Manufacturing: Quotes in Seconds, Parts in Days [online]. Copyright © 2020 3D HUBS B.V. All rights reserved. [cit. 30.11.2020]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/automotive-3d-printing-applications/#introduction>
- [43] Materialise Slicing Technology Enables Toyota's Lightweight Car Seat | Materialise - Innovators you can count on. Materialise | 3D Printing Innovators [online]. Copyright © Copyright Materialise [cit. 30.11.2020]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/en/cases/materialise-slicing-technology-enables-toyota%E2%80%99s-lightweight-car-seat>
- [44] Sklo zadního světla Škoda Felicia pravé : 118-924261 CN. Autotyp Autodíly Škoda | Náhradní díly | Autodoplňky [online]. Copyright © [cit. 14.03.2021]. Dostupné z: <https://www.autotypautodily.cz/sklo-zadniho-svetla-skoda-felicia-prave-118-924261/>
- [45] 1Pair Front Rear Indicator Turn Signal Light Blinker For BMW F800 F650 GS S1000R HP2 Enduro | Wish. Wish - Shopping Made Fun [online]. Dostupné z: <https://www.wish.com/product/5a3a26b4898899386de03e93?share=web>
- [46] Vistar 3D Printing Car Bumper - ProtoFab 3D Printing Service. ProtoFab: Industrial 3D Printer & Service & Software, China Manufacturer [online]. Copyright © 2019 Protofab All Rights Reserved [cit. 30.11.2020]. Dostupné z: <https://www.3dprotofab.com/vistar-3d-printing-car-bumper.html>
- [47] Free CAD Designs, Files & 3D Models | The GrabCAD Community Library. GrabCAD: Design Community, CAD Library, 3D Printing Software [online]. Copyright © 2021 GrabCAD, a STRATASYS solution [cit. 03.04.2021]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/car-tail-lamp-lens-main-direction-1>

- [48] The Ultimate Printing Machine - How BMW is applying 3D printing to commercial vehicles - TCT Magazine. TCT Magazine | Additive Manufacturing & 3D Printing Intelligence | News, Interviews, Features | Additive Manufacturing | Product Development Technology - TCT Magazine [online]. Copyright © 2020 Rapid News Publications Ltd. A Rapid News Communications Group Company. All Rights Reserved [cit. 30.11.2020]. Dostupné z: <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/the-ultimate-3d-printing-machine-bmw/>
- [49] 3D tisk v praxi - 3D tisk krycí masky | 3Dees. Centrum 3D tisku Praha - výhradní dodavatelé 3D tiskáren HP [online]. Dostupné z: <https://www.3dees.cz/3d-tisk-v-praxi/3d-tisk-masky-pro-continental-automotive>
- [50] 3D Systems Takes on F1 Racing, Medical Modeling and Dental 3D Printing > ENGINEERING.com. ENGINEERING.com | Information & Inspiration for Engineers [online]. Copyright © 2020 engineering.com, Inc. All rights reserved. Registration on or use of this site constitutes acceptance of our [cit. 30.11.2020]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/17179/3D-Systems-Takes-on-F1-Racing-Medical-Modeling-and-Dental-3D-Printing.aspx>
- [51] Free CAD Designs, Files & 3D Models | The GrabCAD Community Library. GrabCAD: Design Community, CAD Library, 3D Printing Software [online]. Copyright © 2021 GrabCAD, a STRATASYS solution [cit. 03.04.2021]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/90-97-na-miata-dashboard-vents-1>
- [52] Free CAD Designs, Files & 3D Models | The GrabCAD Community Library. GrabCAD: Design Community, CAD Library, 3D Printing Software [online]. Copyright © 2021 GrabCAD, a STRATASYS solution [cit. 03.04.2021]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/hood-ait-vents-1>
- [53] Free CAD Designs, Files & 3D Models | The GrabCAD Community Library. GrabCAD: Design Community, CAD Library, 3D Printing Software [online]. Copyright © 2021 GrabCAD, a STRATASYS solution [cit. 03.04.2021]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/classic-rear-lens-1>

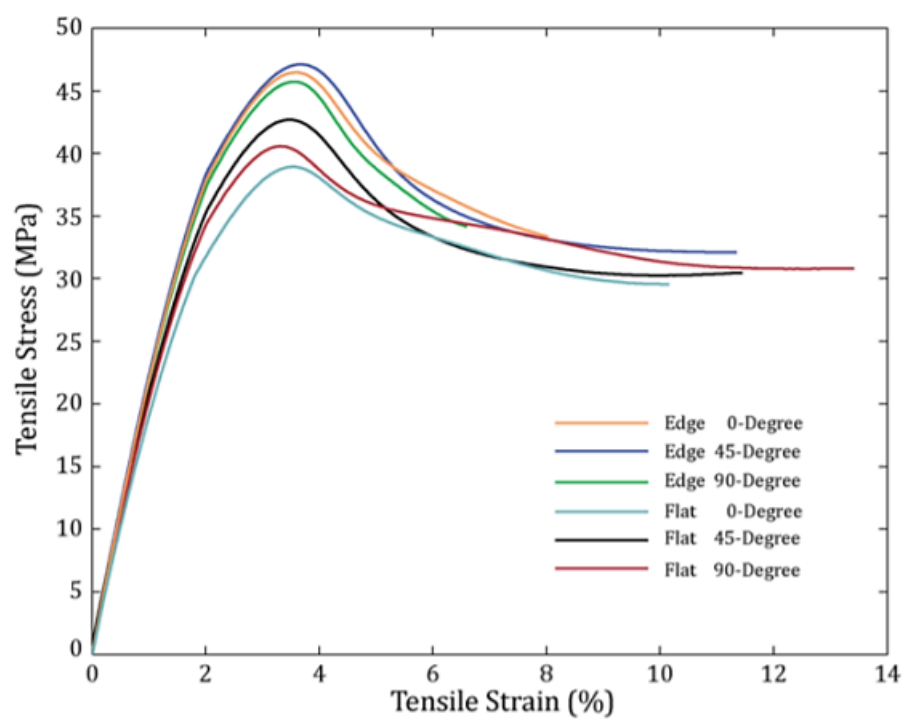
- [54] Prusa Research a.s.: OFFICIAL JOSEF PRUSA SHOP [online]. Prusa Research [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/resiny/940-oranzovy-resin-tvrdy-1kg.html>
- [55] Silikonový kaučuk Lukopren N 1522. Lučební závody a.s. Kolín - lucebni.cz [online]. Dostupné z: <https://www.lucebni.cz/cs/lukopren-n/39-silikonovy-kaucuk-lukopren-n-1522.html>
- [56] Chemex POX Z 21 - sada 1,29 kg - CHEMEX E-SHOP - Epoxidové systémy. CHEMEX E-SHOP - CHEMEX E-SHOP - Epoxidové systémy [online]. Dostupné z: <https://shop.chemex.cz/art-pryskyrice-a-formy/29-testovaci-produkt.html>

Přílohy

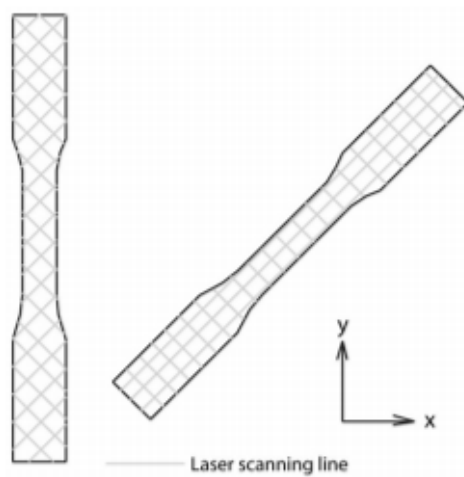
Příloha A – výzkum mechanických vlastností



Rozložení testovaných vzorků [18]



Porovnání meze pevnosti různě orientovaných vzorků [18]



Šrafování pro součást pod úhlem 45 a 90° od osy X [18].

Příloha B – Datasheet teplotně odolné pryskyřice Formlabs

METRIC ¹			METHOD
	Green ²	Post-Cured ³	Post-Cured + Thermally Post-Cured ⁴
Thermal Properties			
Heat Deflection Temp. @ 1.8 MPa	43.6 °C	99.2 °C	101 °C
Heat Deflection Temp. @ 0.45 MPa	49.3 °C	142 °C	238 °C

METRIC ¹			METHOD		
	Green ²	Post-Cured ³	Post-Cured + Thermally Post-Cured ⁴		
Mechanical Properties					
	Ultimate Tensile Strength	20.9 MPa	58.3 MPa	51.1 MPa	ASTM D 638-14
	Elongation at break	14 %	3.3 %	2.4 %	ASTM D 638-14
	Tensile modulus	0.75 GPa	2.75 GPa	2.9 GPa	ASTM D 638-14
	Flexural strength at break	24.1 MPa	94.5 MPa	93.8 MPa	ASTM D 790-15
Flexural modulus	0.69 GPa	2.62 GPa	2.62 GPa	ASTM D 790-15	
Impact Properties					
Notched IZOD	32.8 J/m	18.2 J/m	24.2 J/m	ASTM D 256-10	
Thermal Properties					
Thermal Expansion (0-150 °C)	1181 (µm/m/°C)	79.6 (µm/m/°C)	74 (µm/m/°C)	ASTM E 831-13	

¹ Material properties can vary with part geometry, print orientation, print settings, and temperature.

² Data was obtained from green parts, printed using Form 2, 100 µm, High Temp settings, washed for 5 minutes in Form Wash and air dried without post cure.

³ Data was obtained from parts printed using a Form 2, 100 micron, High Temp settings, and post-cured with Form Cure at 80 °C for 120 minutes.

⁴ Data was obtained from parts printed using a Form 2, 100 micron, High Temp settings, and post-cured with Form Cure at 80 °C for 120 minutes plus an additional thermal cure in a lab oven at 160 °C for 180 minutes.

⁵ Data was obtained from parts printed using a Form 2, 100 micron, High Temp settings, and post-cured with Form Cure at 60 °C for 60 minutes.

⁶ Data was obtained from parts printed using a Form 2, 100 micron, High Temp settings, and post-cured with Form Cure at 60 °C for 60 minutes plus an additional thermal cure in a lab oven at 160 °C for 90 minutes

Příloha C – Datasheet Tough 2000 Resin pryskyřice Formlabs

	METRIC ¹		IMPERIAL ¹		METHOD
	Green ²	Post-Cured ³	Green ²	Post-Cured ³	
Mechanical Properties					
Ultimate Tensile Strength	29 MPa	46 MPa	4206 psi	6671 psi	ASTM D 638-14
Tensile Modulus	1.2 GPa	2.2 GPa	174 ksi	329 ksi	ASTM D 638-14
Elongation at Break	74 %	48 %	74 %	48 %	ASTM D 638-14
Flexural Properties					
Flexural Strength	17 MPa	65 MPa	2465 psi	9427 psi	ASTM D 790-15
Flexural Modulus	0.45 GPa	1.9 GPa	65 ksi	275 ksi	ASTM D 790-15
Impact Properties					
Notched IZOD	79 J/m	40 J/m	1.5 ft-lb/in	0.75 ft-lb/in	ASTM D256-10
Unnotched IZOD	208 J/m	715 J/m	3.9 ft-lb/in	13 ft-lb/in	ASTM D256-10
Thermal Properties					
Heat Deflection Temp. @ 1.8 MPa	42 °C	53 °C	108 °F	127 °F	ASTM D 648-16
Heat Deflection Temp. @ 0.45 MPa	48 °C	63 °C	118 °F	145 °F	ASTM D 648-16
Coefficient of Thermal Expansion	107 µm/m/°C	91 µm/m/°C	59 µin/in/°F	50 µin/in/°F	ASTM E 831-13

¹Material properties can vary with part geometry, print orientation, print settings, and temperature.

²Data was obtained from green parts, printed using Form 2, 100 µm, Tough settings, washed and air dried without post cure.

³Data was obtained from parts printed using Form 2, 100 µm, Tough 2000 settings, and post-cured with a Form Cure for 120 minutes at 80 °C.

Příloha D – Datasheet Durable Resin Formlabs

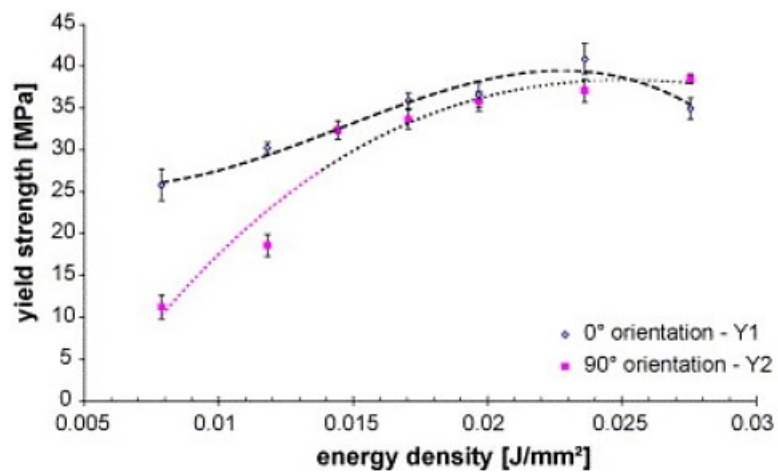
	METRIC ¹		IMPERIAL ¹		METHOD
	Green ²	Post-Cured ³	Green ²	Post-Cured ³	
Tensile Properties					
Ultimate Tensile Strength	13 MPa	28 MPa	1900 psi	3980 psi	ASTM D 638-14
Tensile Modulus	0.24 GPa	1.0 GPa	34 ksi	149 ksi	ASTM D 638-14
Elongation at Break	75 %	55 %	75 %	55 %	ASTM D 638-14
Flexural Properties					
Flexural Stress at 5% Strain	1.0 MPa	24 MPa	149 psi	3420 psi	ASTM D 790-17, Procedure A
Flexural Modulus	0.04 GPa	0.66 GPa	5.58 ksi	94.1 ksi	ASTM D 790-17, Procedure A
Impact Properties					
Notched IZOD	127 J/m	114 J/m	2.37 ft-lb/ft/in	2.13 ft-lb/ft/in	ASTM D 256-10 (2018), Test Method A
Unnotched IZOD	972 J/m	710 J/m	18.2 ft-lb/ft/in	13.3 ft-lb/ft/in	ASTM D4812-11
Temperature Properties					
Heat Deflection Temp. @ 0.45 MPa	< 30 °C	41 °C	< 86 °F	105 °F	ASTM D 648-18, Method B
Thermal Expansion	124 µm/m/°C	106 µm/m/°C	69.1 µin/in/°F	59 µin/in/°F	ASTM E831-14

¹Material properties can vary with part geometry, print orientation, print settings, and temperature.

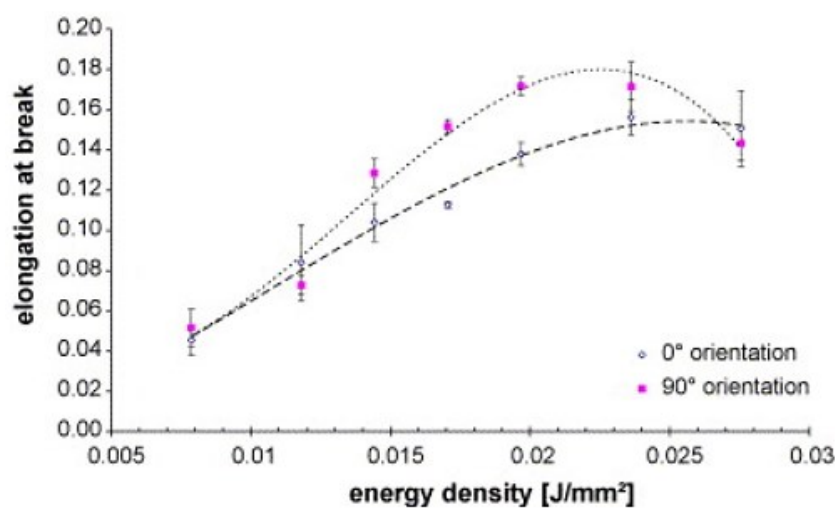
²Data was obtained from green parts, printed using Form 2, 100 µm without additional treatments.

³Data was obtained from parts printed using Form 2, 100 µm and post-cured with a Formcure for 120 minutes at 60°C.

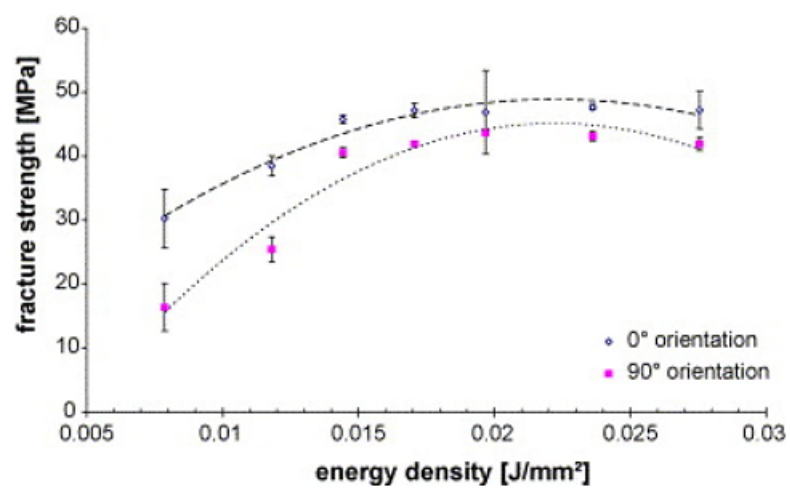
Příloha E – Grafy zobrazující závislosti různých veličin na energii laseru



Závislost R_e na hustotě dodané energie [33]


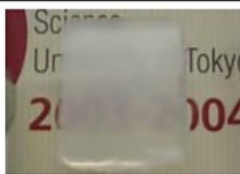





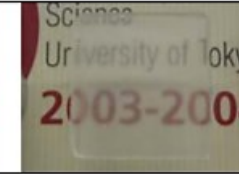
Závislost prodloužení při přetržení na hustotě dodané energie [33]



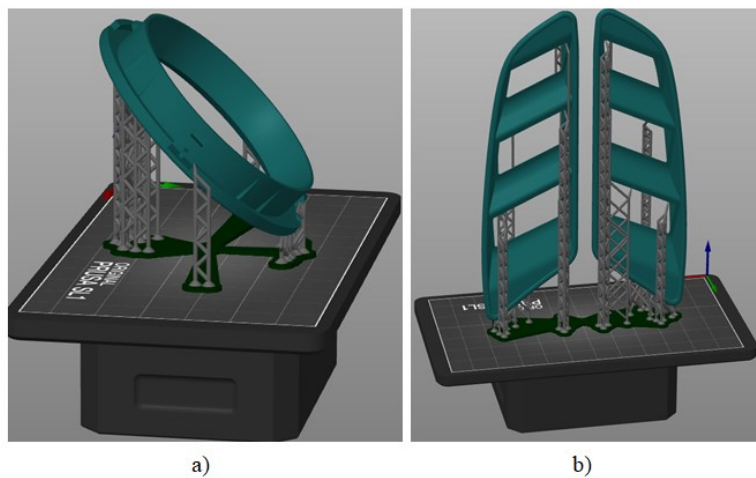
Závislost pevnosti v lomu na hustotě dodané energie [33]

Příloha F – Výsledná průhlednost v závislosti na teplotě, času a výkonu laseru [34]

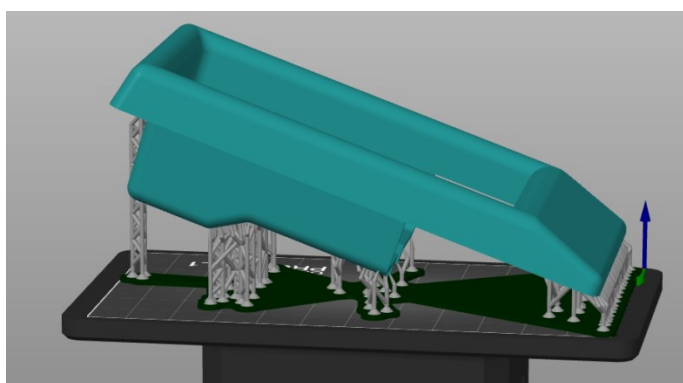
Temperature	25 C°	35 C°	45 C°
Duration	120hours	48hours	48hours
Photo			
Haze [%]	33.3	70.2	78.7

Laser Power	15W	20W	30W
Photo			
Haze [%]	35.0	37.0	42.4

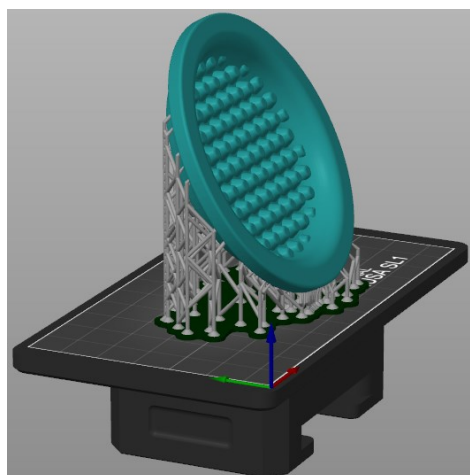
Příloha G – Návrhy jednotlivých dílů na pracovní ploše



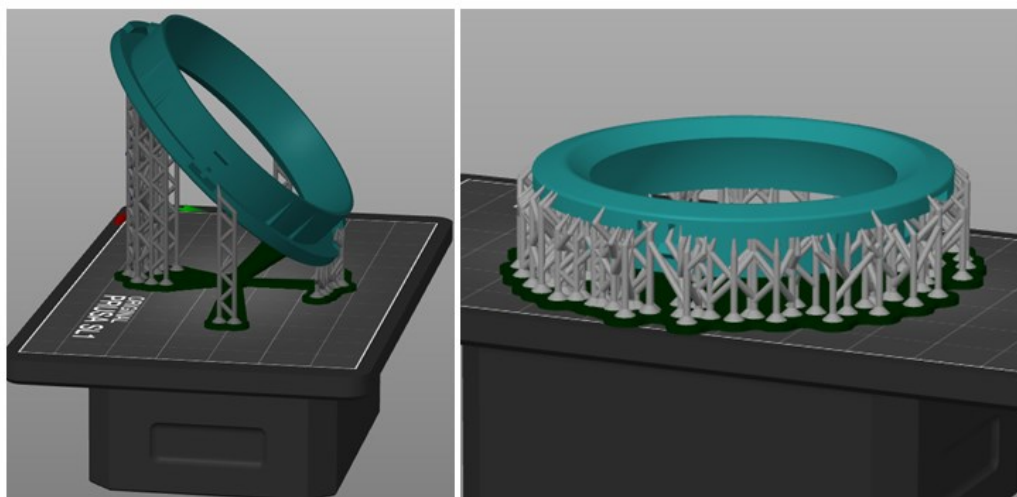
Upravené modely a vygenerované podpěry a) zajišťovacího kroužku, b) výdechů karoserie



Rámeček kliky



Připravený model sklička



a)

b)

Porovnání návrhu tisku zajišťovacího kroužku. Vlevo první návrh pod úhlem 40° a vpravo součást rovnoběžně s podložkou

Příloha H – Datasheet Prusa Resin

Prusa Resin - Tough (Tvrký) Technický list

Název	Prusa Resin - Tough (Tvrký)
Užití	3D tisk
Dodavatel	Prusa Research a.s., Praha, Česká republika

Tisková nastavení

Vrstva [mm]	Čas [s]
0,025	7,5
0,035	6
0,05	7
0,1	10

První vrstva - 35 s

Doporučená vytvrzovací nastavení po tisku

Sušení - 3 minuty při 35 °C

Vytvrzování - 15 minut při 35 °C

Mechanické vlastnosti

Vlastnost / Směr tisku	Nevytvrzený XY	Vytvrzený XY	Metoda
Pevnost v tahu [MPa]	36,0±1,9	52,0±2,7	ISO 527
Prodloužení na mezi kluzu [%]	3,00±0,12	4,20±0,19	ISO 527-1
Modul pružnosti v tahu [GPa]	1,14±0,08	1,25±0,09	ISO 527
Rázová houževnatost - Charpy bezvrubový [kJ/m2]	22,1±3,5	19,8±4,4	ISO 179
Rázová houževnatost - Charpy vrub. [kJ/m2]	5,93±0,26	2,50±0,53	ISO 179

Výtisky tištěny ve směru XY dle doporučených tiskových nastavení v PrusaSliceru.

[54]

Příloha I – Technický list silikonového kaučuku Lukopren N 1522

Dávkování katalyzátoru a vulkanizační charakteristiky při 23 ± 2°C, 50 ± 5 % RH

Lukopren N	1522	5221	Super	5541	1725	6681	1000
Pracovní teplota (°C)	+5 až +40 při nižší vzdušné vlhkosti se doba provulkanizace především u silných vrstev zvyšuje, vulkanizát může i delší dobu dolepovat						
Lukopren katalyzátor N hm. % (g/100g)	2,5 - 3	2 - 3	3 - 3,5	2 - 3	2 - 2,5	2,5	3 - 6
Minimální doba zpracovatelnosti (min)	55 - 40	40 - 25	45 - 35	100 - 60	30 - 20	45	65 - 25
Odformování * minimálně po (hod)	6 - 4	4,5 - 3	3,5 - 3	5 - 3	5,5 - 4	* tloušťka stěny formy / odlitku do 6 mm	
Manipulace se zalitou** vrstvou po (hod)	**U silnějších vrstev nad 1 cm není vulkanizace plně ukončena - vytvořená struktura již umožňuje manipulaci					24	6,5 - 3

Lukopren N 1000 vyžaduje pro rovnoměrný průběh vulkanizace přimíchání vody předem do hmoty, max. 0,1 hm. %

Technické parametry kaučukové pasty a katalyzátoru

Lukopren N	1522	5221	Super	5541	1725	6681	1000
Barva	krémová	slonová kost	průsvitná a modrá	červenohnědá	okrová	holubičí šed'	čirá
Viskozita při 20°C (Pa.s) (ČSN 640349)	10 - 15	14	6 - 10	20	190 - 250	19	2,0 - 2,5
Hustota (kg/m ³)	1250	1100	1040	1200	1250	1580	980
Lukopren Katalyzátor N: hustota 1,07 g/cm ³ , viskozita 6,5 mPa.s, čirá až nažloutlá kapalina							

Parametry vulkanizátu vulkanizace 48 hod za standardních podmínek (23 ± 2°C, 50 ± 5 % RH)

Lukopren N	1522	5221	Super	5541	1725	6681	1000
Pevnost v tahu (MPa) (ČSN ISO 37)	3,4 - 3,6	1,6 - 1,9	1,4 - 1,6	3,4 - 3,7	3,9 - 4,2	2,1 - 2,3	0,4 - 0,6
Tažnost (%) (ČSN ISO 37)	130 - 140	280 - 300	170 - 190	110 - 130	160 - 170	70 - 80	110 - 120
Tvrdost (°ShA) (ČSN ISO 7619-1)	53 - 55	23 - 25	30 - 32	55 - 57	58 - 60	59 - 63	23 - 26
Lineární smrštění max. (%)	max. 0,3	max. 0,3	max. 0,35	max. 0,35	max. 0,3	max. 0,3	max. 0,4
Tepelná odolnost (°C)	-50/250	-50/180	-50 /180	-50/250 (320)	-50/180	-50/180	-50/180
Součinitel tepelné vodivosti (W/m.K)	0,23-0,29					1,5	0,23-0,29
Elektrická pevnost (kV/mm)	min. 13					41	min. 13
Měrný odpor (Ω . cm) (při frekvenci 1 kHz)	min. 10 ¹²					min. 10 ¹²	min. 10 ¹²
Permitivita (při 100kHz-1MHz)	3 - 3,4	-	-	-	2,8-3,2	-	-
Ztrátový činitel (tgδ.10 ³) (při 100kHz-1MHz)	5 - 7	-	-	-	4 - 7	-	-

Vyhovují směrnici 2011/65/EU (RoHS2)

U silnostěnných odlitků/vrstev s tloušťkou nad 1 cm bude doba odformování/doba dosažení finálních parametrů min. 48 hodin. V případě rychlého uzavření zalévaného prostoru se doba dosažení konečných parametrů dále prodlužuje.

Lukopren N dvousložkové silikonové kaučuky

Příloha J – Technický list epoxidové pryskyřice CHEMEX POX Z 21

CHEMEX - POX Z 21

Epoxidový transparentní zalévací systém – přímý styk s potravinami

Popis

Bezrozpuštědlový epoxidový systém na bázi vysoce kvalitní modifikované epoxidové pryskyřice. Vyznačuje se nízkou viskozitou, vytvrzováním za normální teploty, téměř bez zápachu. Systém je možné probarvovat pigmenty Chemex Pigment L, M a F. Certifikát na přímý kontakt s potravinami.

Použití

Používá se na výrobu transparentních odlitků, reklamních a dekorativních předmětů. Dále se používá v modelářství. Je určen pro odlitky o tloušťce až 6 cm.

VÝHODY

- Transparentnost odlitku
- Vytvrzování za normální teploty
- Dlouhá doba zpracovatelnosti
- Možnost probarvení různými odstíny při zachování transparentnosti
- Vhodné i pro domácí využití za dodržení bezpečnostních pokynů
- Minimální smrštění

Mísící poměry a vlastnosti

	sl. A : sl. B
Složky váhově	100 : 29

Vlastnosti systému po smíchání	
	Směs sl. A : sl. B
Mísící poměr složek A : B váhově	100 : 29
Viskozita při 23 °C mPa.s	254
Vzhled	Čirá kapalina
Zpracovatelnost při 25°C	< 6 hod
Tvrdost	75 D Shore
Maximální doporučená tloušťka odlitku	6 cm
Maximální množství lití v jednom kroku*	15 kg
Doba vytvrzení k odformování při 23° C	cca 48 hod.

* Při tloušťce 6 cm a teplotě 20° C. Se vzrůstající teplotou se množství snižuje.

[56]